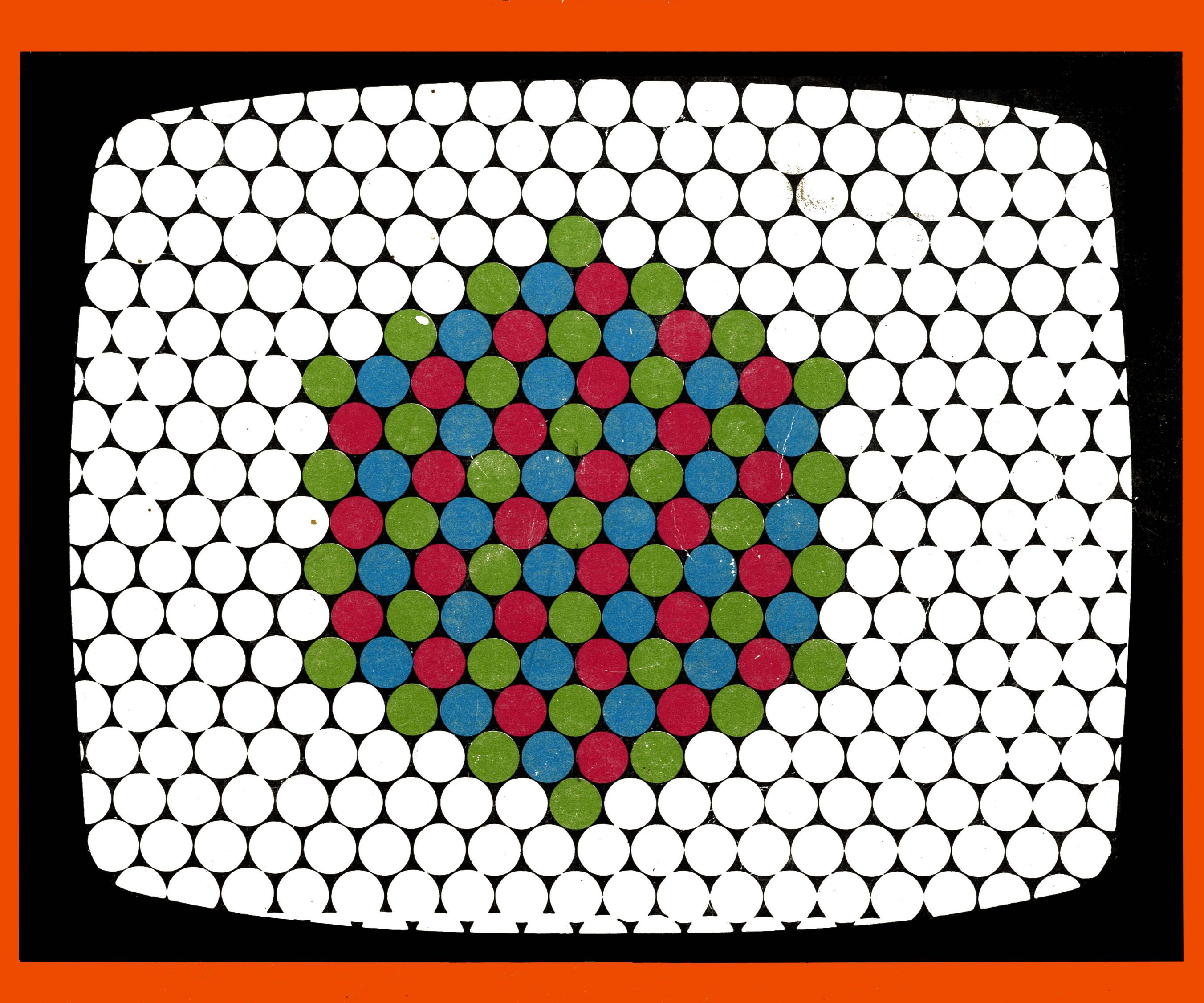
E. AISBERG
J.P. DOURY



LA TÉLÉVISION EN COULEURS ?..
c'est presque simple !

ÉDITIONS RADIO

LA TÉLÉVISION EN COULEURS ?..

C'est presque simple !

AUTRES OUVRAGES DE E. AISBERG

(Les dates sont celles des premières éditions)



OUVRAGES ÉPUISÉS

J'ai compris la T.S.F. (préface du Professeur R. Mesny, 1926, traduit en 21 langues).

Les postes de T.S.F. alimentés par le secteur (1930).

Phototélégraphie et Télévision (préface de M. Edouard Belin, 1930).

Théorie et pratique de la Télévision (en collaboration avec R. Aschen, 1932).

Précis de Radioélectricité (en collaboration avec A. Néoussikhine, 1933).

Manuel Technique de la Radio (en collaboration avec H. Gilloux et R. Soreau, 1937).

Cours Complémentaire de Radioélectricité (1941).

Dépannage professionnel Radio (1942).

Amélioration et modernisation des récepteurs (1942).

La modulation de fréquence et ses applications (1945).

Méthode dynamique de dépannage et de mise au point (en collaboration avec A. et G. Nissen, 1945).

Mathématiques pour techniciens. Arithmétique et algèbre.

La Radio?... Mais c'est très simple! (Traduit en 13 langues.)



OUVRAGES ACTUELS

La Télévision?... Mais c'est très simple! (Traduit en 17 langues.)

Le Transistor?... Mais c'est très simple! (Traduit en 9 langues.)

La Radio et la Télévision?... Mais c'est très simple!

Radio-Tubes (en collaboration avec R. Deschepper et L. Gaudillat).

La physique dans la vie quotidienne.

E. AISBERG
Fondateur des Editions Radio



J.-P. DOURY
Ingénieur E.S.E

LA TÉLÉVISION EN COULEURS ?..

C'est presque simple !

La couleur phénomène physique et physiologique. — Colorimétrie. Emission et réception dans les systèmes NTSC, PAL et SECAM

Dessins marginaux de
Christine ŒHMICHEN

TROISIEME EDITION
REVUE ET AUGMENTÉE



SOCIÉTÉ DES ÉDITIONS RADIO
9, rue Jacob — Paris-6e

I.S.B.N. 2.7091.0589.0

Imprimé en France
Imprimerie Dalex, Montrouge (Seine)

Dépôt légal 1er trimestre 1974
Editeur n° 589 — Imprimeur n° 1138

50 ans après

Il y a près de 50 ans, à l'aube de la radiodiffusion, mon premier livre, « *J'ai compris la T.S.F.* », devait faciliter l'initiation à la radio-électricité à des centaines de milliers de lecteurs, tant en France que dans de nombreux pays étrangers.

Avec l'avènement des tubes à chauffage indirect, il a fallu écrire un nouveau volume analysant l'anatomie et la physiologie des récepteurs alimentés par le secteur. Ainsi est né « *La Radio?... Mais c'est très simple!* » qui, constamment remis à jour, constituait l'ouvrage de base donnant l'accès au domaine de l'électronique.

L'invention du transistor devait, en 1948, ouvrir l'ère des semiconducteurs. Pour faciliter la conversion nécessaire, les deux personnages qui dialoguaient dans le précédent volume, CURIOSUS et IGNOTUS, se sont retrouvés dans les pages de « *Le Transistor?... Mais c'est très simple!* ».

Et dans « *La Télévision?... Mais c'est très simple!* », les mêmes éternellement jeunes gens étudient la technique de la transmission des images « en noir et blanc », tout en effleurant le problème de la couleur.

Enfin, en 1972 j'ai rédigé un livre 100 % nouveau : « La Radio et la Télévision?... Mais c'est très simple! » expliquant l'état actuel de nos techniques, livre que l'on publie en traduction dans un grand nombre de pays.

De nos jours, on emploie beaucoup de télévision en couleurs. Son avènement en Europe fut précédé d'innombrables discussions. Le choix entre les divers systèmes proposés fut d'autant plus délicat qu'aux facteurs purement techniques (qui, seuls, auraient dû entrer en ligne de compte) sont venues s'ajouter des raisons d'ordre financier et même politique. Triste résultat : l'Europe se trouve, une fois de plus, divisée.

Cependant, les divers systèmes ne diffèrent entre eux que par un dixième environ des principes de base, les autres neuf dixièmes leur étant communs.

CURIOSUS et IGNOTUS ne pouvaient pas rester indifférents devant l'avènement de la couleur. De tous côtés, on me demandait quand allait paraître « *La Télévision en couleurs?... Mais c'est très simple!* ».

C'est un titre que je ne pouvais pas adopter. *Si la télévision achrome est, par sa complexité, de la radio au carré, la télévision polychrome est de la radio au cube.* Aussi, étions-nous tentés d'intituler ce livre « La Télévision

en Couleurs?... Mais c'est bougrement compliqué! », comme aime s'exprimer IGNOTUS. Mais le titre adopté correspond assez à la vérité, grâce à la façon dont CURIOSUS et son oncle sont parvenus à expliquer les choses.

Pour rédiger ce livre, j'ai fait appel à la collaboration de mon ami Jean-Pierre DOURY, ingénieur E.S.E., qui œuvrait efficacement dans le domaine de la télévision en couleurs au sein même du principal organisme technique d'où est issu le système français SECAM. Sa contribution fut pour moi très précieuse, car rien ne saurait remplacer l'expérience acquise en maniant d'une main des équations différentielles et de l'autre le fer à souder et l'oscilloscope. De plus, pour avoir fait de nombreuses conférences de démonstration dans divers pays d'Europe et du Proche-Orient, Jean-Pierre DOURY a l'habitude d'exposer très clairement les principes de la nouvelle technique.

Nous n'avons pas voulu copier mes précédents livres en présentant tous les chapitres en forme de dialogues. Le lecteur appréciera sans doute la forme variée des exposés qui facilitera l'assimilation d'une technique — il faut le répéter — extrêmement complexe.

Mais, si l'effort d'attention est couronné de cette récompense suprême qu'est la compréhension, à la satisfaction du lecteur viendra s'ajouter celle des auteurs.

E. AISBERG.

AVERTISSEMENT POUR LA DEUXIEME ET TROISIEME ÉDITIONS

L'accueil très favorable rencontré par la première édition de ce livre, épuisée en moins d'un an en dépit de son tirage élevé, nous a incités à le compléter en vue de le rendre également utile dans tous les pays d'Europe, indépendamment du système de télévision en couleurs adopté.

Les neuf premiers chapitres sont valables pour tous les systèmes. Cependant, dans la suite, les chapitres analysant le schéma d'un téléviseur couleurs et traitant de sa mise au point ont été dédoublés, en sorte que le SECAM et le PAL sont examinés et expliqués avec le même soin.

Nous regrettons qu'il ne fût pas possible de faire une Europe unie en matière de télévision en couleurs. Mais, les choses étant ce qu'elles sont, nous avons voulu traiter, avec le maximum d'objectivité et sur un pied d'égalité, les deux systèmes que se partagent les pays du vieux continent.

E. A. et J.-P. D.



CHAPITRE PREMIER

CURIOSUS et IGNOTUS sont deux jeunes gens que connaissent bien tous ceux qui ont lu « La Radio et la Télévision?... Mais c'est très simple! » et les autres ouvrages qui, sous des titres semblables, traitent des transistors et de la télévision. C'est CURIOSUS qui a enseigné à son ami IGNOTUS les principes fondamentaux de ces diverses branches de l'électronique. IGNOTUS est loin d'être bête et, comme en témoigne sa lettre que l'on lira ci-après, il ne demande qu'une chose : de moins en moins justifier son nom. Le lecteur ne saura que partager cette soif de la connaissance.

L'AVÈNEMENT DE LA COULEUR

IGNOTUS ÉCRIT A CURIOSUS

Mon cher ami,

Décidément, mes ennuis continuent! Les choses vont trop vite à mon gré : la technique progresse de plus en plus rapidement.

A peine ai-je, grâce à nos entretiens, assimilé la technique de la radio-électricité en étudiant les circuits à tubes électroniques, que les semiconducteurs ont fait une victorieuse irruption en bouleversant tout dans ce domaine. Vous m'avez aidé à comprendre les mœurs des transistors, et je vous en suis reconnaissant. Cependant, je me demande, si, un de ces jours, succédant à l'ère du vide, puis à celle du solide, il ne va pas s'ouvrir quelque nouvelle ère rendant périmées les notions si péniblement acquises...

Me voici, aujourd'hui, en présence d'une nouvelle révolution. Le mot n'est pas trop fort. Vous m'avez initié aux secrets de la télévision. Et je me disais que, de ce côté, tout était bien stabilisé... Pauvre de moi! Une fois de plus, tout a changé avec l'avènement de la télévision en couleurs.



J'ai l'impression que cette nouvelle technique est infiniment plus compliquée que celle — qui l'est déjà bougrement — de la transmission des images en noir et blanc.

Que dois-je faire? Comment affronter cette nouvelle situation? Et pourquoi, diable, a-t-il fallu introduire cette sacrée couleur, puisque tout allait fort bien en noir et blanc?

Je me demande si je ne ferais pas mieux d'abandonner l'électronique et me vouer à l'agriculture. Qu'en pensez-vous?

Votre fidèle ami

IGNOTUS

CURIOSUS RÉPOND A IGNOTUS

Mon pauvre Ignotus,

Véritable cri de détresse, votre lettre m'a profondément ému. Je vous réponds sans retard, afin que l'irréparable ne s'accomplisse point.

Certes, l'agriculture manque de bras. Mais l'électronique a besoin de cerveaux. Et le vôtre lui sera précieux.

Conclusion inéluctable : vous allez vous remettre à la page en étudiant la nouvelle technique de la télévision en couleurs.

Ne soyez surtout pas injuste : n'accablez pas de reproches les chercheurs qui, mettant à la torture leur matière grise, ont doté l'humanité de ce merveilleux moyen d'animer les écrans des téléviseurs. Car, comme a dit je ne sais quel grand homme (à moins que cette forte pensée ne soit de moi), *la couleur c'est la vie.*



Regardez un paysage à travers des lunettes de soleil à verres fortement teintés : il est plat, triste, gris, monotone. Enlevez ces lunettes, et tout devient vivant, plein de chatoyantes couleurs. Il y a la même différence qu'entre un air de flûte solo, pauvre à souhait, et une symphonie exécutée par un grand orchestre aux timbres infiniment variés...

Pensez à l'enrichissement que la couleur a apporté à la photographie, au cinéma et aussi à la presse périodique. Comment aurait-on pu ne pas tenter d'en faire également bénéficier la télévision?

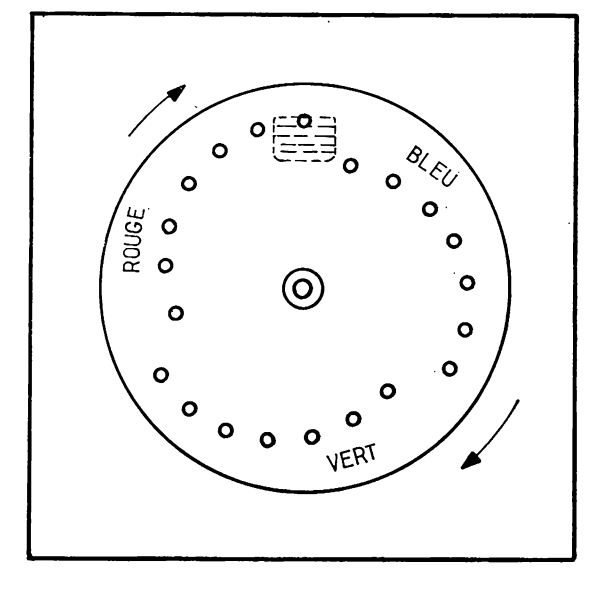


Fig. I-1. — Disque de Nipkow adapté par J.-L. Baird à la transmission des images en couleurs.

Le fait est que, dès ses premiers balbutiements, on a cherché à lui faire transmettre des images en couleurs. Le pionnier de la télévision mécanique, John Lodgie Baird, celui qui, vers 1925, est parvenu à analyser et à reproduire des images à l'aide d'un disque de Nipkow, était déjà préoccupé par le problème de la couleur. Sans toutefois aller jus-

qu'à l'expérimenter, le génial Ecossais conçut le projet d'un disque pourvu de trois séries de perforations recouvertes de filtres, de manière à explorer, puis à reproduire les images successivement en rouge, en bleu et en vert. Ainsi le principe de la trichromie venait-il faire une entrée — toute théorique au demeurant — dans le domaine de l'à peine née télévision.

Il faut attendre les années d'après-guerre pour voir les premières réalisations pratiques. La firme anglaise *Pye* et, de l'autre côté de l'Atlantique, la chaîne américaine de télévision *Columbia Broadcasting System* présentent des démonstrations très réussies de transmission

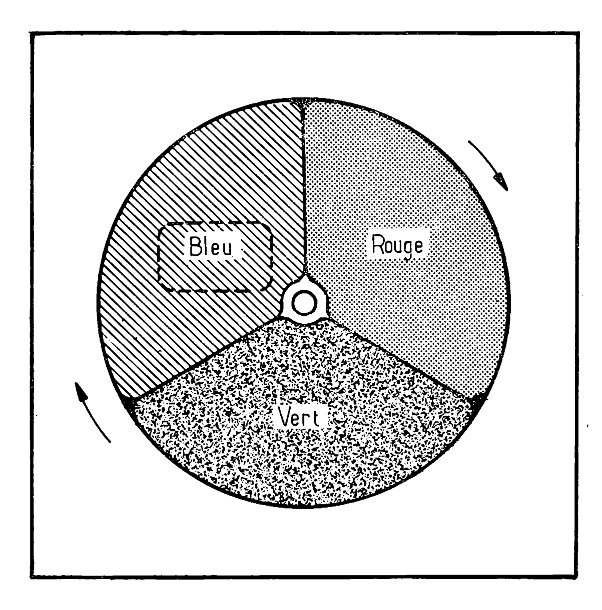


Fig. I-2. — Filtre tricolore placé devant l'écran (en pointillé) d'un tube cathodique et tournant de manière à montrer les images successivement en bleu, vert et rouge.

des images en couleurs. Devant l'écran du tube cathodique (assez petit à l'époque), tourne un disque composé de trois filtres : rouge, bleu et vert. De la sorte, l'image apparaît successivement dans chacune de ces trois couleurs. Or, à l'émission, un disque semblable et dont la rotation est synchrone de celle du disque à la réception, explore l'image successivement dans les trois couleurs. Celles-ci se suivent à une cadence suffisamment rapide pour que les sensations se superposent dans la perception du téléspectateur, de manière que les couleurs d'origine se trouvent reproduites...



Mais j'ai tort de vous exposer les principes de ce système sans vous avoir au préalable inculqué les notions indispensables concernant la couleur et sa perception.

Aussi m'abstiendrai-je de vous expliquer maintenant comment fonctionne le système NTSC qui est employé aux Etats-Unis et au Japon où des millions de foyers sont équipés de téléviseurs pour images en couleurs. Je ne vous dirai pas davantage comment sont conçus le système français SECAM et le système allemand PAL, tous deux adoptés en Europe. Sachez seulement que, *pour 90 %, ces trois systèmes actuels sont fondés sur les mêmes principes* et ne diffèrent, par conséquent, entre eux que de 10 %. Voilà de quoi vous rassurer un peu au seuil de votre nouvelle **étude**.



Car, mon cher ami, celle-ci s'avère indispensable. Il faut vous initier à la télévision en couleurs, puisque celle-ci a rapidement conquis les principaux pays de notre vieux continent. Elle a apporté avec elle non seulement une nouvelle dimension, des possibilités inédites pour la réalisation des programmes, une véritable joie pour les yeux, mais, de surcroît, elle facilite grandement, en le rendant plus efficace, *l'enseignement* par télévision. Je ne saurais trop insister sur l'importance de la télévision dans la diffusion des connaissances, en particulier pour les pays en voie de développement où l'auditoire est dispersé sur des immenses étendues et où l'on manque de professeurs...

J'espère vous avoir démontré l'incontestable intérêt, sinon l'impérieuse nécessité, de l'intrusion de la couleur dans la télévision. Je suis prêt, si vous le souhaitez, à vous aider à la reconversion qu'entraîne cette évolution de la technique.

Voulez-vous apprendre la télévision en couleurs? Alors venez bavarder avec moi dès que vous voudrez.

Votre ami
CURIOSUS



CHAPITRE II

Avant de parler de la transmission des images en couleurs, il faut préciser les diverses caractéristiques de la couleur considérée en tant que phénomène physique et en tant que sensation. Ce à quoi sera consacrée cette causerie qui portera sur les sujets que voici :

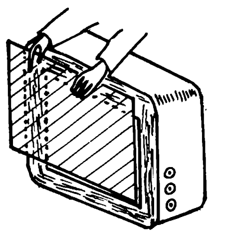
Définition de la télévision en couleurs. — Limites de la lumière visible. — Analyse spectrale de la lumière blanche. — Aberration chromatique. — Pouvoir de résolution. — L'œil moyen et le daltonisme. — Anatomie et physiologie de l'œil.

COUP D'ŒIL SUR L'ŒIL

En jouant sur les mots.

CURIOSUS. — Ravi de vous revoir, Ignotus. Mais vous n'avez pas l'air bien content.

IGNOTUS. — Je suis furieux! Peut-on à ce point abuser de la crédulité humaine?!... C'est révoltant!



CUR. — Calmez-vous, cher ami. Et expliquez-moi les raisons de votre indignation.

IG. — C'est bien simple. Mes voisins, un charmant jeune couple, m'invitent à voir chez eux la télévision en couleurs. A un prix relativement modique, ils ont, me disent-ils, acquis un merveilleux dispositif qui a transformé leur téléviseur en noir et blanc en récepteur d'images en couleurs.

CUR. — Cela me paraît tout à fait impossible. Et qu'avez-vous vu?

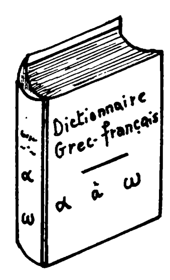
IG. — Tout bonnement un filtre teinté, placé devant l'écran. Le quart inférieur vert-jaune, le quart supérieur bleu, le milieu orangé, le passage d'une teinte à l'autre s'effectuant progressivement. Tant qu'on voyait des paysages, cela pouvait aller : la végétation en vert et le ciel en bleu n'étaient pas déplaisants à voir. Mais quand a paru, en gros plan, le visage de la présentatrice, l'effet fut désastreux...

CUR. — Il est évident que cela n'a rien à voir avec la véritable télévision en couleurs. Les ingénieux fabricants du filtre coloré ont joué sur les mots. Et, en cette matière, il faut bien s'entendre sur le sens précis des termes que nous allons employer.

IG. — Il me semble que les expressions « télévision en noir et blanc » et « télévision en couleurs » sont suffisamment explicites par elles-mêmes pour ne pas nécessiter de définitions complémentaires.

Cur. — Grande est votre erreur, ami. Peut-on parler de « noir et blanc » quand on dispose de toute la gamme intermédiaire des gris? Et ne savez-vous pas que les couches fluorescentes de certains tubes-images donnent des teintes telles que le bleu pour les uns ou le sepia pour les autres. Aussi serait-il, à mon avis, préférable de parler de *télévision monochrome,* puisqu'il s'agit d'images ayant une teinte unique (du grec *monos* = seul et *khrôma* = couleur).

Ig. — Je pense qu'en ce cas, la véritable télévision en couleurs, où les images apparaissent en couleurs variées, devrait être désignée du terme *polychrome* (du grec *polus* = nombreux).



Le phénomène physique et sa perception.

Cur. — Et vous avez raison. Toutefois, maintenant que nous avons clairement défini le sens des expressions, nous emploierons indifféremment « noir et blanc » ou « monochrome » d'une part, et, d'autre part, « en couleurs » ou « polychrome ». Ce qui est plus important, c'est d'établir nettement la différence entre la *couleur objective* et la *couleur subjective.*

Ig. — Qu'entendez-vous par là?

Cur. — Beaucoup de confusions résultent, dans l'étude des sciences, de ce qu'une distinction nette n'est pas établie entre le phénomène physique et sa perception.



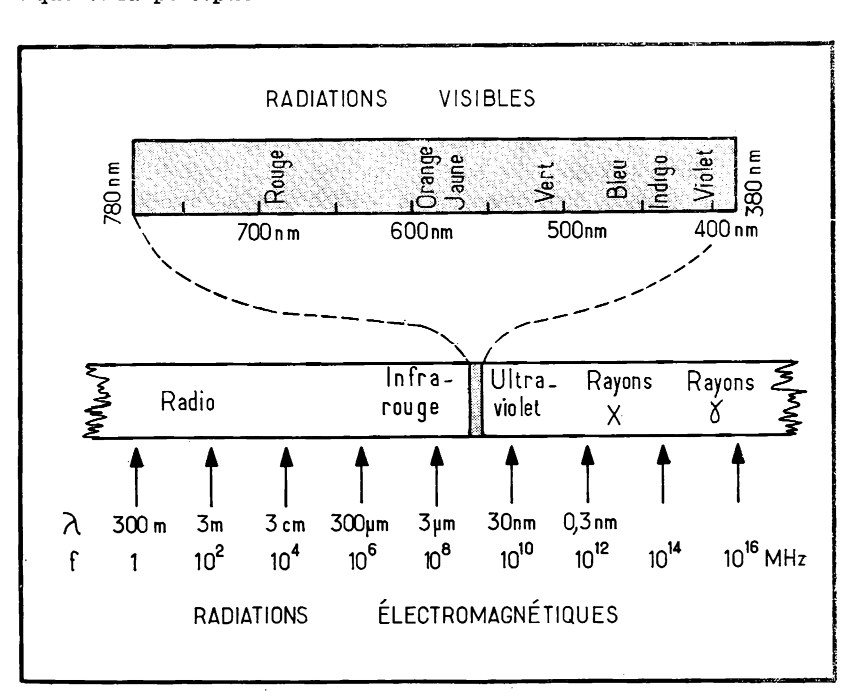
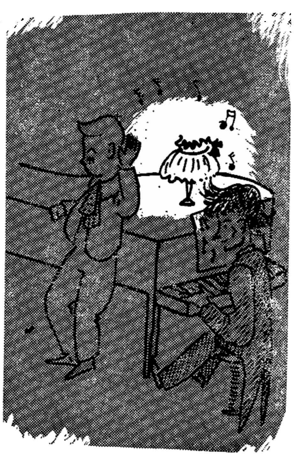


Fig. II-1. — Dans le vaste spectre (représenté en bas) des ondes électromagnétiques, la lumière visible n'occupe qu'une étroite bande qui est représentée en haut considérablement élargie.

(Voir cette figure en couleurs page 33.)



Ig. — Est-ce de la philosophie? Un exemple concret m'aiderait à mieux saisir votre pensée.

Cur. — Je vais l'emprunter à un domaine qui vous est familier : celui de l'acoustique. Quelles caractéristiques distinguez-vous dans un son qui atteint vos oreilles?

Ig. — Tout d'abord sa *hauteur,* car il peut être grave, moyen ou aigu. Puis, son *timbre,* car, pour la même hauteur, une flûte et un violon n'émettent pas le même son. Et, bien entendu, il y a *l'intensité* ou, si vous préférez, la « force » du son qui va de l'à peine perceptible *pianissimo* jusqu'au *fortissimo* qui vous crève les tympans.

Cur. — Très bien. Vous avez décrit vos perceptions sonores. Mais, sur le plan physique, à quoi correspondent-elles?

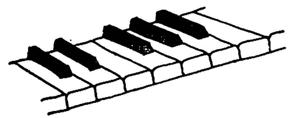
Ig. — La hauteur dépend de la *fréquence* des vibrations longitudinales des molécules de l'air. Le timbre est déterminé par les vibrations *harmoniques* accompagnant la fondamentale. Et l'intensité sonore est fonction de l'*amplitude* des vibrations.

Cur. — Vingt sur vingt, cher ami! Vous avez parfaitement établi la distinction entre les phénomènes physiques et leur perception qui, elle, est du ressort de la physiologie. Nous nous efforcerons de procéder de la même manière dans le domaine de la lumière...

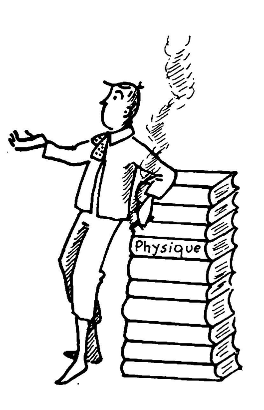
Ig. — ...Et tout deviendra lumineux! Je le souhaite d'autant plus ardemment que bien des choses concernant les couleurs me paraissent obscures... sans jeu de mots.

Cur. — Commençons donc par le commencement. Qu'est-ce que la lumière?

A peine une octave...



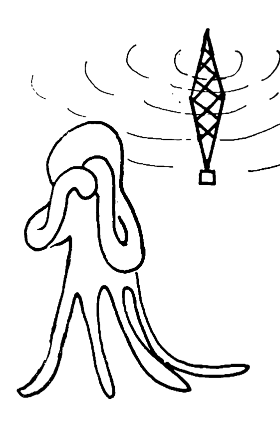
Ig. — Croyez-vous que j'ai oublié mon cours de physique? La lumière fait partie de la vaste gamme des ondes électromagnétiques au même titre que les ondes radio-électriques. Elle n'en diffère que par la longueur plus courte de ses ondes. D'ailleurs, j'ai lu que l'on est parvenu à produire, par des moyens presque classiques, des ondes radio-électriques aussi courtes que les rayons infrarouges, cette lumière invisible qui côtoie les plus longues ondes lumineuses. Et, de l'autre côté du spectre de la lumière visible, on a encore des radiations invisibles, cet ultraviolet qu'on appelle aussi « lumière de Wood ». Et si nous descendons aux longueurs d'onde encore plus courtes, nous entrons dans le domaine des rayons X, puis dans celui des rayons gamma pour aboutir aux rayons cosmiques.



Cur. — Vous parlez comme un livre! Pourriez-vous préciser les valeurs des longueurs d'onde de la lumière et la place qu'elle occupe dans le spectre des ondes électromagnétiques?

Ig. — Je n'ai pas la mémoire des nombres. Mais je me souviens qu'en fréquence cela fait à peine une octave; c'est dire que la fréquence des ondes dans le violet est le double de celles correspondant au rouge.

Cur. — C'est exact. La lumière visible se situe entre 790 THz et 385 THz. Je vous rappelle que le térahertz (THz) est égal à 1 000 000 000 000 hertz soit à un million de mégahertz. En longueurs d'onde cela correspond à 380 nm et 780 nm. Et vous savez qu'un nanomètre (nm) ou millimicron (mμm) est égal à 0,000 000 001 mètre; soit dit en passant, il serait plus correct de dire « millimicromètre ». Et vous savez aussi qu'on a pratiquement abandonné l'emploi de l'unité « angström » (Å) qui est égale à 0,1 nm.



Ig. — Les limites des longueurs d'onde que vous m'indiquez pour la lumière visible sont, en fait, déterminées justement par notre sens de la vision. Il est possible que dans un autre monde, habité par des êtres dont l'anatomie et la physiologie diffèrent des nôtres, les ondes électromagnétiques perçues en tant que sensations visuelles se situent dans une autre bande du spectre de fréquences. Imaginez une de ces créatures débarquant chez nous d'une soucoupe volante et... éblouie par les ondes que rayonne un émetteur de radio...

Cur. — Je constate que vous lisez beaucoup de livres de science-fiction. Loin de moi l'idée de vous en blâmer, car la fiction d'aujourd'hui devient souvent réalité de demain. On peut, bien entendu, dire que la lumière et les couleurs n'existent que dans la mesure où nous les percevons. Une certaine philosophie ne va-t-elle pas jusqu'à affirmer que le monde n'existe qu'en tant que la conscience que nous en prenons. Mais cela nous éloigne de notre sujet qui est, dans l'immédiat, l'étude de la lumière. Celle qui nous vient du soleil...

La lumière blanche.

Ig. — L'étincelant Phœbus nous arrose de lumière blanche qui, Newton l'a démontré, se compose en réalité de radiations de toutes les couleurs.

L'expérience classique du prisme permet, en effet, de décomposer la lumière blanche en un spectre continu de couleurs. L'indice de réfraction dépend de la fréquence. Aussi, passant par le prisme, les rayons violets seront-ils déviés le plus de leur trajectoire initiale et les rouges le moins. Entre ces deux extrémités, on trouvera le bleu, le vert, le jaune et l'orangé.

Cur. — Je suis heureux de vous avoir entendu dire « spectre *continu* de couleurs ». En effet, dans la bande lumineuse projetée par le prisme, les teintes varient continûment. Et c'est par une convention commode que l'on désigne de divers noms (violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge) des plages déterminées de cette bande. Parmi ces noms conventionnels, « indigo » n'a pas d'autre raison d'être que le souci qu'avaient nos grands-pères d'avoir *sept* couleurs, le chiffre 7 jouant un rôle dans diverses mystiques. En fait, il est plus rationnel de désigner d'un nom particulier la teinte intermédiaire entre le vert et le bleu : c'est le turquoise; mais on a adopté le terme *cyan* d'origine anglo-saxonne. Quoi qu'il en soit, nous sommes, dans le spectre, en présence d'un ensemble des radiations de *toutes* les fréquences entre les limites indiquées.

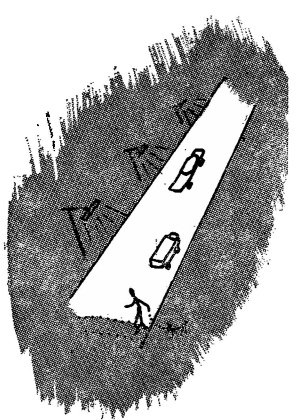
Ig. — Ainsi donc s'étalent sous nos yeux toutes les couleurs possibles?

Cur. — Pas toutes. Car le spectre du prisme ou l'arc-en-ciel (lui aussi dû à la réfraction de la lumière dans des gouttelettes d'eau) ne comprend pas les teintes pourpres (ou magenta) qui résultent du mélange du rouge et du violet, ces deux teintes extrêmes de la lumière visible. Mais lesdites *teintes pourpres n'existent que dans notre sensation;* elles résultent de la perception simultanée de radiations rouges et violettes dont les proportions peuvent, d'ailleurs, largement varier.

Ig. — Mais peut-on, comme en radio-électricité, émettre non pas une bande de fréquences telle que le spectre de la lumière du soleil, mais seulement des radiations d'une seule fréquence?

Cur. — On y parvient en portant à l'incandescence divers gaz ou vapeurs. Ils émettent un *spectre discontinu* de radiations. Ainsi, par exemple, les puissantes lampes à vapeur de sodium, employées pour l'éclairage public, émettent une lumière jaune sur des longueurs d'onde de 589 et 589,6 nm, pratiquement *mono-chromatique,* c'est-à-dire d'une seule teinte, ce qui assure une vision plus nette.

Ig. — Pourquoi? Le jaune est-il mieux perçu par l'œil humain?

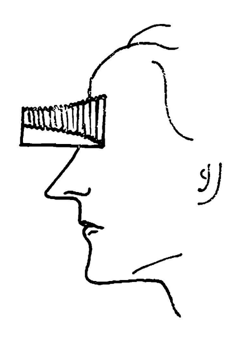


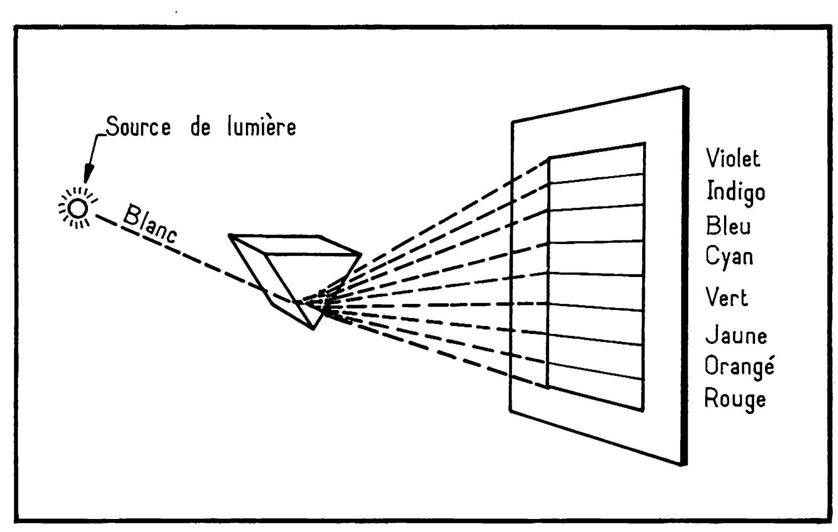
L'aberration chromatique.

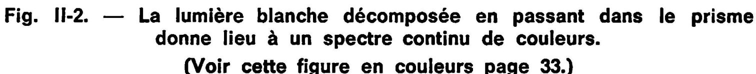
Cur. — Non point. La sensibilité maximale de l'œil humain se situe dans le vert, pour la longueur d'onde de 555 nm. Mais le fait d'avoir une lumière monochromatique élimine le phénomène de *l'aberration chromatique.*

Ig. — Jamais entendu parler de cet aberrant phénomène.

Cur. — Vous savez, Ignotus, que l'œil peut être assimilé à un appareil de photo où le cristallin joue le rôle de l'objectif et la rétine celui de la surface photosensible. Or, n'avons-nous pas dit tout à l'heure, en

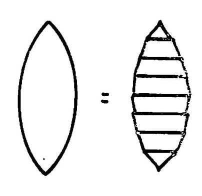





Fig. II-2. — La lumière blanche décomposée en passant dans le prisme donne lieu à un spectre continu de couleurs.

(Voir cette figure en couleurs page 33.)

parlant du prisme, que l'indice de réfraction varie en fonction de la fréquence des radiations? Une lentille, un objectif composé de plusieurs lentilles, c'est encore des prismes. Les rayons y sont réfractés et concentrés dans des points que l'on appelle « foyers ». Vous comprenez dès lors que les rayons bleus ont un foyer plus proche de l'objectif alors que le foyer des rayons rouges en est plus éloigné. Quand nous contemplons un objet multicolore, le cristallin s'accomode (c'est-à-dire s'incurve) de manière que les foyers des rayons verts se trouvent dans le plan de la rétine.



Ig. — Mais alors les foyers des rayons bleus se trouveront en avant de la rétine et ceux des rouges en arrière?

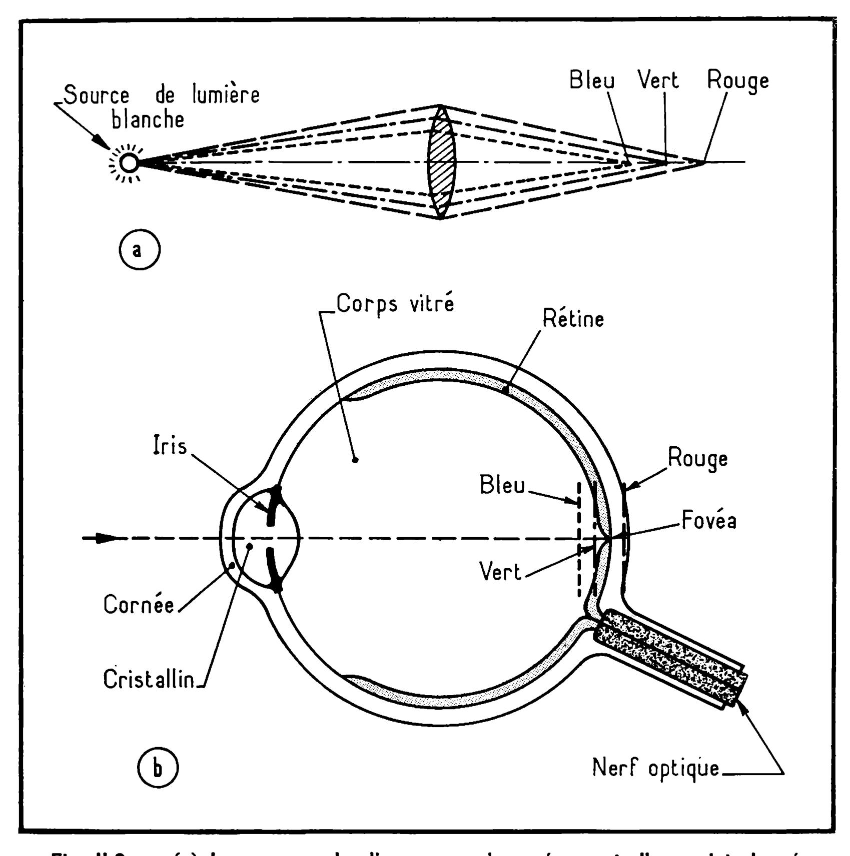


Fig. II-3. — **(a) Les rayons de diverses couleurs émanant d'un point donné sont concentrés par une lentille dans des foyers plus ou moins éloignés, selon la fréquence des diverses composantes de la lumière. (b) Coupe schématique de l'œil. Le cristallin joue le rôle de lentille. L'image d'un objet multicolore se forme dans plusieurs plans : si l'accomodation (obtenue en variant la courbure du cristallin) se fait sur les rayons verts (auxquels l'œil est le plus sensible), l'image verte se trouve dans le plan de la rétine; la bleue en avant; la rouge en arrière. C'est dire que ces deux dernières images ne seront pas nettes.**

(Voir cette figure en couleurs page 33.)



CUR. — Parfaitement. Je vois que vous avez bien saisi le phénomène de cette aberration chromatique en vertu duquel nous ne pouvons pas voir simultanément tous les détails d'une image multicolore avec la même acuité. Mais quand il s'agit d'un éclairage monochromatique, comme dans le cas des lampes à vapeur de sodium, l'accomodation se fait exactement sur la longueur d'onde unique, en l'occurrence celle de la lumière jaune, et l'image se forme dans le plan même de la rétine.

IG. — Si je comprends bien, nous ne pouvons pas voir des images multicolores avec une netteté aussi bonne que des images monochromes.

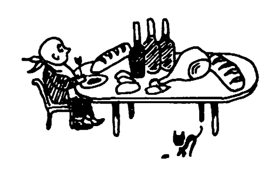
CUR. — Vous avez raison, cher ami. Et, pourtant, le pouvoir de résolution de l'œil moyen, dans l'axe du regard, est aussi bon pour la couleur que pour les images qu'on dit « en noir et blanc ». Il est d'envi-

ron une minute d'angle, c'est-à-dire 1/60ᵉ de degré. A une distance de 1 mètre, l'œil moyen est capable de distinguer deux points séparés de 0,3 mm. Mais les images formées en avant et en arrière de la rétine ne bénéficient guère de ce pouvoir de résolution.

Fictions statistiques.

IG. — Qu'appelez-vous « œil moyen »?

CUR. — C'est une fiction statistique, au même titre que le « Français moyen ». De celui-ci on sait qu'il consomme, en une année, 101,5 kg de pain, 2,7 kg de jambon de Paris, 16,6 kg de bœuf, 37,1 litres de bière et 170 litres de vin (1). En réalité, un tel individu n'existe pas. De même le véritable « œil moyen » ne se trouve pas. Ses caractéristiques sont établies d'après des mesures effectuées sur des milliers de personnes constituant un échantillonnage suffisant pour qu'on puisse en déduire des moyennes valables. C'est ainsi que l'on a pu établir la courbe de *sensibilité chromatique* de l'œil moyen qui montre que, pour des radiations de puissance égale, la perception décroît au fur et à mesure que l'on s'écarte de ce maximum qui, je l'ai déjà dit, se situe dans le vert. Et quand la sensibilité devient nulle, nous sortons du



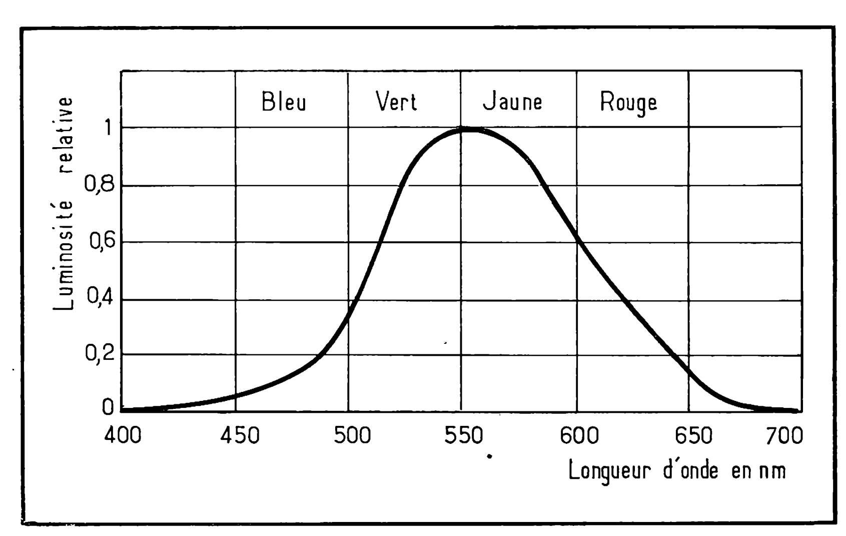


Fig. II-4. — Courbe de sensibilité relative de l'œil moyen pour différentes couleurs du spectre.

domaine de la lumière visible. Cette courbe joue un rôle important dans la technique de la télévision en couleurs. Mais, je dois insister là-dessus, elle concerne ce fameux « œil moyen ». N'empêche qu'il peut y avoir des écarts individuels notables.

(1) Données publiées dans l'*Annuaire Statistique de la France* édité en 1964 et concernant l'année 1962.

IG. — Je sais, dans cet ordre d'idées, qu'il y a même des personnes incapables de distinguer des couleurs. On les appelle *daltoniens*. Un de mes amis est affligé de cette sorte d'infirmité. Il a dû me l'avouer le jour où je l'ai vu se promener avec une chaussette rouge et une autre verte.



CUR. — Environ une personne sur deux cents est incapable de distinguer ces deux couleurs. Et, chose curieuse, cette infirmité est beaucoup plus fréquente parmi les hommes que parmi les femmes. Il y a également des individus dont l'œil est totalement insensible aux couleurs voisines de l'extrémité rouge du spectre.

IG. — En somme, notre œil est loin d'être ce parfait instrument digne de la plus grande confiance dont témoigne l'expression : « Je l'ai vu, de mes yeux vu... » C'est bien triste! A qui et à quoi se fier?

Utilisation rationnelle des défauts.

CUR. — Ne vous en plaignez pas. Bien souvent, je vous ai dit que le grand art dans la vie consiste à tirer profit des défauts des choses et des gens. Si le cinéma et la télévision ont pu être réalisés, c'est parce que notre sens de la vision est affligé d'une certaine lenteur assurant la persistance des sensations visuelles durant un bon dixième de seconde. Et vous verrez que les méthodes de la télévision en couleurs mettent à profit d'autres imperfections de notre sens de la vue telles que le manque d'acuité chromatique dû notamment à l'aberration du même nom; ou encore un certain manque de « sélectivité » qui empêche de distinguer nettement deux teintes dont les longueurs d'onde correspondantes sont peu différentes. Avez-vous aussi remarqué que l'on ne perçoit guère la couleur d'objets trop petits ou trop fins?



IG. — Je le sais. Voilà pourquoi ma mère, lorsqu'elle veut assortir un fil à coudre au tissu employé, superpose à celui-ci toute une bobine et non un seul fil.

CUR. — Et, pour la même raison, un typographe qui connaît son métier choisira des caractères gras pour des textes imprimés en couleurs; avec des lettres maigres, on ne peut pas se rendre compte de leur teinte. C'est vous dire, Ignotus, que *nous n'avons pas à nous préoccuper de la restitution de détails très fins en couleurs.*

IG. — Je devine que, de la sorte, on pourra se contenter, dans la transmission de la couleur, d'une bande de fréquences du signal vidéo relativement étroite.

CUR. — C'est exact. Mais avant d'en arriver là, il serait bon d'examiner de plus près les aspects physiologiques de la couleur et leurs rapports avec ses caractéristiques physiques. A cette fin, il serait bon d'analyser de plus près cet organe de réception des rayons lumineux qu'est l'œil.

Anatomie et physiologie de l'œil.

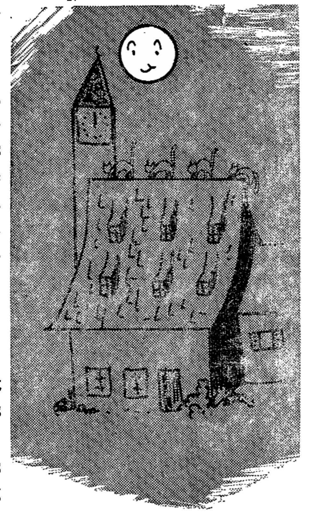
IG. — Je crois connaître assez bien la question. Nous avons déjà dit que l'œil peut être assimilé à un appareil de photo. Le cristallin est semblable à un objectif effectuant une mise au point automatique; les muscles qui l'entourent modifient sa courbure de manière à effectuer la

mise au point en fonction de la distance de l'objet, pour que l'image projetée sur la rétine soit aussi nette que possible.

CUR. — Très bien, ami. Continuez donc votre exposé en expliquant la structure et le rôle de la rétine.

IG. — Celle-ci tapisse le fond de l'œil. Elle sert de surface photosensible. Je sais que la lumière y détermine des réactions chimiques et électriques que le nerf optique achemine vers le cerveau où elles suscitent des sensations lumineuses. Mais je ne saurais analyser en détail ces réactions.

CUR. — Moi non plus, car bien des choses dans ce domaine demeurent encore inexpliquées. Mais, du moins, connaît-on la composition des éléments photosensibles de la rétine. Selon leur forme, on les appelle des « cônes » et des « bâtonnets ». Chaque œil contient quelque 120 millions de bâtonnets et 6 millions de cônes. C'est vous dire combien ces éléments sont minuscules.



IG. — Et quelles sont les fonctions respectives de ces éléments?

CUR. — Les cônes servent à percevoir les couleurs, alors que les bâtonnets réagissent uniquement à l'intensité lumineuse indépendamment de la teinte. Encore ne sont-ils pas également sensibles à toutes les longueurs d'onde; c'est dans le vert-jaune que leur réponse est le plus efficace; dans le rouge, leur rendement est environ moitié moindre, et dans le bleu, ils ne réagissent que très peu (fig. II.4). De sorte que, si l'on appelle V l'intensité de lumière verte reçue par un bâtonnet, R l'intensité de lumière rouge et B celle de la lumière bleue, et si ce bâtonnet n'est pas excité par d'autres lumières que ces trois là, l'intensité lumineuse globale qu'il reçoit n'est pas R + B + V, mais

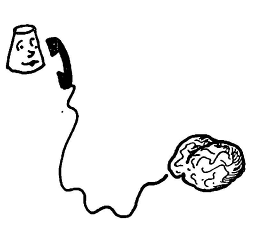
$$0{,}59\ V + 0{,}30\ R + 0{,}11\ B$$

ces trois coefficients étant choisis de façon que les rapports soient conservés et que leur somme soit égale à l'unité. Ils sont beaucoup plus sensibles à la lumière (plusieurs milliers de fois!) que les cônes.

C'est vous dire qu'aux faibles éclairements, seuls les bâtonnets interviennent dans la vision (que l'on appelle alors « crépusculaire »); les couleurs, par conséquent, ne sont pas perçues.

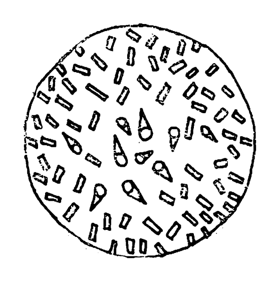
IG. — Je comprends d'où vient le dicton « La nuit, tous les chats sont gris ». Mais le jour...

CUR. — ... vous pouvez admirer le pelage d'un chat tigré, d'un siamois ou d'un persan en distinguant aussi la couleur de leurs beaux yeux. Car ce sont alors les cônes de la rétine qui entrent en action. Quel en est le mécanisme exact? Je ne saurais le dire. Mais à la fin du siècle dernier, le physicien anglais Thomas YOUNG émit l'hypothèse selon laquelle il existerait trois catégories de cônes : les uns sensibles aux rayons rouges, les autres aux verts, les troisièmes aux bleus. Cette hypothèse était exacte : en 1964, des biophysiciens de l'université américaine *John Hopkins* ont prouvé expérimentalement que YOUNG avait raison. Les cônes effectuent ainsi une véritable analyse du contenu spectral de la lumière. Chaque catégorie de cônes transmet au cerveau des informations relatives à l'intensité lumineuse dans la plage des teintes qui est de son ressort.



Messages individuels ou collectifs.

IG. — Je m'imagine le cerveau recevant, par exemple, le message suivant : « Ici le cône disposé à tel degré de latitude nord et tel degré



de longitude est de la rétine; je reçois un flux de tant de lumens sur la plage de longueurs d'onde allant, dans l'orangé, de 590 à 640 mm. »

CUR. — En fait, le cerveau ne reçoit pas de messages individuels de chaque cône ou bâtonnet, car le nombre des lignes de transmission, en l'occurrence les fibres du nerf optique, est de l'ordre d'un million. C'est dire que chaque fibre doit acheminer des « messages collectifs » émanant sans doute d'un groupe d'éléments de même catégorie.

Pour être complet, j'ajouterai que, dans le centre de la rétine se trouve une petite dépression appelée *fovea* ou « tache jaune » qui est tapissée uniquement de cônes qui y sont disposés avec le maximum de densité. C'est dire qu'on distingue le mieux les détails des images en couleurs dans la partie correspondant à l'axe du regard. Les bâtonnets, tout à fait absents dans la *fovea,* sont de plus en plus denses au fur et à mesure qu'on s'approche des extrémités de la rétine. Voilà pourquoi la « vision périphérique » procure une grande netteté pour les détails qui se distinguent par leur luminosité.

En revanche, en dehors de l'axe du regard, l'acuité visuelle pour les couleurs diminue sensiblement en raison de la raréfaction des cônes.

IG. — Tout cela me paraît clair. Mais ce serait encore plus lumineux pour moi si vous pouviez me suggérer quelques expériences concrètes, comme on en présente dans des cabinets de physique.

CUR. — Rien de plus facile. Voulez-vous, Ignotus que, la prochaine fois, nous nous rencontrions à la salle d'Optique du Palais de la Découverte?



CHAPITRE III

Un certain nombre d'expériences permettront à CURIOSUS de mieux faire comprendre à son ami les diverses lois qui régissent le monde des couleurs. Ce faisant, il traitera des problèmes suivants :

Synthèse des couleurs à l'aide du disque de Newton. — La couleur des objets. — Méthodes soustractive et additive. — Teinte, luminance et saturation. — Couleurs fondamentales. — Principe de la trichromie. — Cylindre de Munsell. — Illusions d'optique.

AU PALAIS DE LA DÉCOUVERTE

Décomposition et reconstitution.

IGNOTUS. — Qu'il fait noir ici! Et moi qui croyais que cette salle, consacrée à l'étude de la lumière, serait illuminée *a giorno!*

CURIOSUS. — Ne soyez pas surpris. De même que, lorsqu'on est malade, on se rend mieux compte de ce que signifie une bonne santé, c'est dans l'obscurité qu'on met plus commodément en évidence le comportement de la lumière... Voici, d'ailleurs, la preuve de ce que je

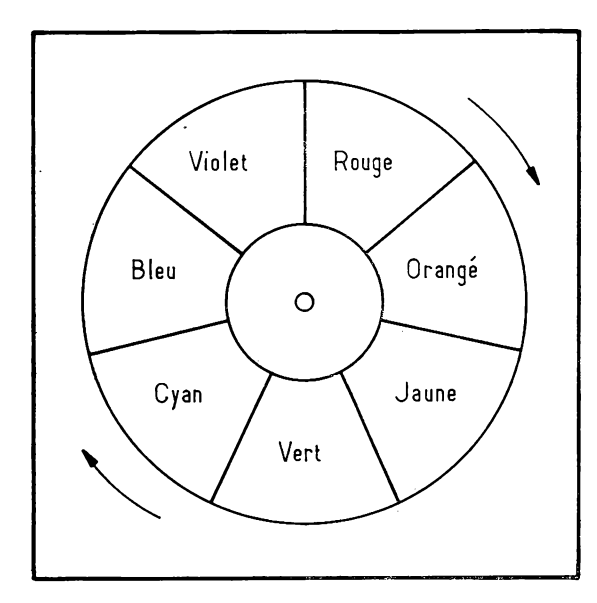
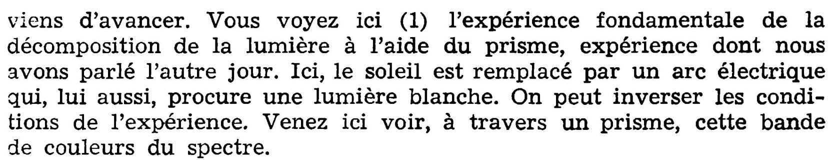
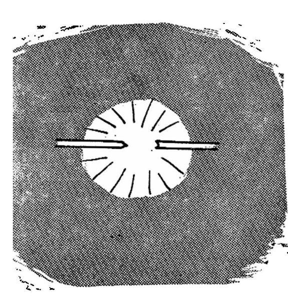


Fig. III-1. — Si l'on fait tourner ce disque de Newton assez rapidement, les couleurs se superposent dans notre perception et procurent la sensation de lumière blanche.



viens d'avancer. Vous voyez ici (1) l'expérience fondamentale de la décomposition de la lumière à l'aide du prisme, expérience dont nous avons parlé l'autre jour. Ici, le soleil est remplacé par un arc électrique qui, lui aussi, procure une lumière blanche. On peut inverser les conditions de l'expérience. Venez ici voir, à travers un prisme, cette bande de couleurs du spectre.



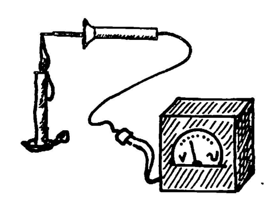
IG. — Comme je m'y attendais, je vois de la lumière blanche. En se recomposant, les diverses couleurs du spectre reconstituent la lumière blanche. C'est encore un cas de la réversibilité des phénomènes de la physique. Tournez une dynamo, elle produira du courant. Alimentez-la en courant, et elle tournera en devenant moteur.

CUR. — Branchez un fer à souder sur une prise de courant, et il chauffera. Chauffez la panne du fer, et vous recueillerez aux bornes du courant alternatif à 50 Hz!

IG. — Ne vous moquez pas de moi, Curiosus! Je sais bien que tous les phénomènes de la nature ne sont pas également réversibles... Mais qu'est-ce que ce disque sur lequel tout le spectre des couleurs de l'arc-en-ciel est si joliment disposé?

CUR. — C'est le disque de NEWTON. Si vous appuyez sur le bouton, il se mettra à tourner.

IG. — Allons-y! Ça alors!... Il est devenu blanc! Evidemment. J'aurais dû y penser. Là encore, les couleurs se recomposent.

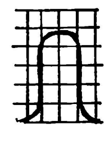


CUR. — Il y a cependant une différence entre la recomposition dans le prisme où il s'agit d'une superposition de toutes les composantes *dans l'espace* et cette addition *dans le temps* qui a lieu avec le disque de NEWTON. Dans cette dernière expérience, le phénomène se produit grâce à la persistance des sensations visuelles. Mais puisque nous en sommes au chapitre des sensations, passons voir une très amusante expérience. Que voyez-vous là?

La couleur des objets.

IG. — Des carrés de bristol de diverses couleurs : un blanc, un rouge, un vert et un bleu.

CUR. — Et ils sont éclairés par une lumière blanche. Maintenant, appuyez sur ce bouton marqué R. Vous voyez que nos carrés sont maintenant éclairés par une lumière rouge. A cette fin, un filtre en verre rouge est venu se placer devant la source de lumière. Il arrête toutes les longueurs d'onde à l'exception d'une étroite bande située autour de 700 nm.



IG. — C'est ce que nous appelons en radio-électricité filtre passe-bande. Eh bien, dans cet éclairage, le carré blanc est devenu rouge. Le rouge l'est resté. Mais, diable, pourquoi donc les carrés vert et bleu sont-ils devenus noirs?

CUR. — C'est très simple. Un objet est vert quand il absorbe tous les rayons lumineux de longueurs d'onde autres que celles des rayons verts que, seuls, il réfléchit. Ici, la lumière rouge ne contient pas de rayons verts. Aussi notre carré ne réfléchit-il aucun rayon. Et l'absence de lumière s'appelle en bon français « noir ».

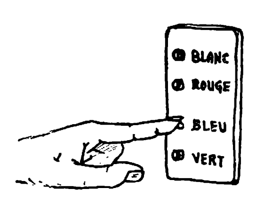
IG. — C'est donc ce qui se passe également avec le carré bleu qui absorbe tous les rayons excepté les bleus qu'il réfléchit. Et avec cet

(1) Le lecteur est charitablement averti que la Salle d'Optique telle qu'elle est décrite ici ne correspond guère à ce qu'est, en réalité, la section d'optique du Palais de la Découverte.

éclairage rouge qui ne contient pas de rayons bleus, notre carré devient noir. Puis-je en conclure que la couleur des objets dépend aussi bien de leurs propriétés d'absorption et de réflexion que de la composition de la lumière qui les éclaire?

CUR. — C'est la conclusion logique de l'expérience présentée ici.

Soustraction des couleurs.



IG. — J'appuie maintenant sur le bouton B. Très jolie, cette lumière bleue. Et, comme je m'y attendais, les carrés rouge et vert sont devenus noirs, alors que le bleu redevient bleu et le blanc l'est aussi... En somme, *un objet blanc*, si je comprends bien, *est celui qui n'absorbe aucune lumière et en réfléchit toutes les longueurs d'onde.*

CUR. — Bien entendu. Et de même *un objet noir est celui qui absorbe toutes les longueurs d'onde sans réfléchir aucune lumière.*

IG. — Je comprends maintenant pourquoi un côté des astronefs est peint en noir et l'autre en blanc. Quand les cosmonautes veulent se

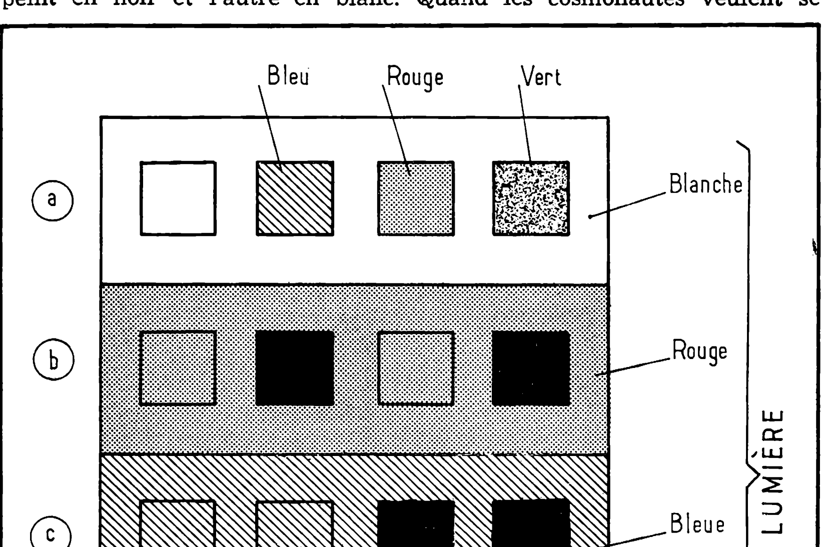
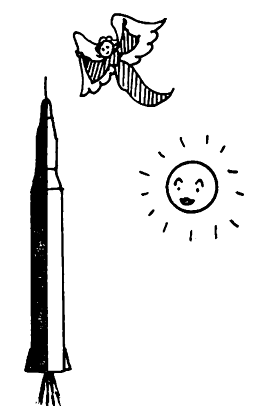


Fig. III-2. — Eclairés de lumière blanche (a), les quatre carrés sont blanc, bleu, rouge et vert. En lumière rouge (b), en lumière bleue (c) et en lumière verte (d), seuls conservent leur couleur ceux de la teinte correspondante.

(Voir cette figure en couleurs page 34.)

réchauffer, ils orientent leur fusée de manière à présenter au soleil le côté noir qui en absorbe les rayons. Et quand ils ont trop chaud, ils tournent vers le soleil le côté blanc qui réfléchit les rayons.



CUR. — Je vois que vous avez bien assimilé tous les enseignements des livres de science-fiction...

IG. — En réfléchissant à ce que je viens de voir, je constate que la couleur que nous percevons est due à une sorte de « soustraction ». Les filtres colorés, au même titre que les surfaces colorées des objets,

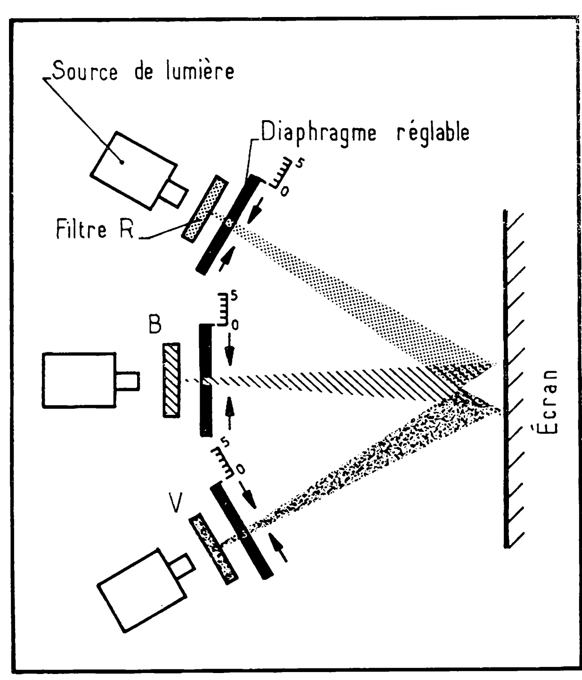
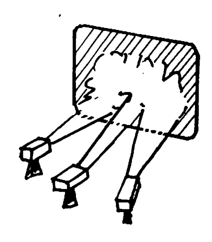


Fig. III-3. — Trois sources de lumière blanche pourvues de filtres Rouge, Bleu et Vert et de diaphragmes réglables permettant de doser l'intensité des rayons projetés sur un écran blanc. Les mélanges additifs ainsi obtenus permettent de reproduire la plupart des couleurs.

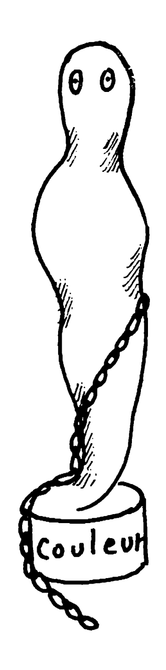
procèdent de la même façon : ils enlèvent une partie du contenu spectral de la lumière. Le filtre le fait en interdisant le passage à certaines longueurs d'onde; la surface colorée, en les absorbant.



CUR. — Oui, dans les deux cas, les couleurs sont obtenues par la *méthode soustractive*. C'est le cas des diapositives en couleurs où chaque élément de surface constitue un petit filtre. Dans le domaine des phénomènes *physiques*, intervient uniquement cette méthode soustractive.

Cependant, des couleurs peuvent également être obtenues par la *méthode additive*. Mais il s'agit alors d'un phénomène *psychophysiologique;* diverses longueurs d'onde perçues simultanément donnent lieu à des sensations qui s'intègrent dans notre cerveau. Venez là et amusez-vous à composer vous-même toutes sortes de couleurs en superposant les rayons émanant de ces trois projecteurs. Ils convergent sur ce même écran blanc. L'un des projecteurs est pourvu d'un filtre rouge, l'autre d'un bleu, le troisième d'un vert. Et chacun est équipé d'un diaphragme réglable, permettant de doser l'intensité des rayons projetés. C'est vous dire que vous pouvez obtenir un nombre infiniment grand de divers mélanges de ces trois couleurs. Allez-y! Je vous laisse toute liberté pour expérimenter ce dispositif à votre guise.

Découverte de la luminance.



Ig. — Voyons d'abord ce que donne un seul projecteur. Je ferme complètement les diaphragmes du rouge et du bleu. Et j'ouvre progressivement celui du vert. Je vois toujours la même teinte pure de vert devenant de plus en plus lumineuse.

Cur. — Vous êtes en présence d'une couleur pratiquement pure, c'est-à-dire due à des rayons ayant des longueurs d'onde presque identiques. En variant le diaphragme, vous ne modifiez que la quantité d'énergie lumineuse projetée. Graphiquement, le spectre de cette lumière serait représenté par un trait vertical dont l'amplitude varie en fonction de l'ouverture du diaphragme. Cependant, dans votre perception, la couleur conserve la même *teinte* (on dit parfois « tonalité » ou encore « nuance »), mais sa *luminance* varie. Retenez bien, Ignotus, la signification de ces deux termes. Et, maintenant, commencez vos mélanges.

Le blanc en trichromie.

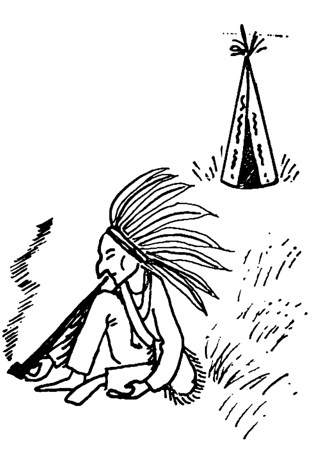
Ig. — Je vais tout d'abord régler l'ouverture des trois diaphragmes à la même valeur, par exemple moitié du maximum. Mais que vois-je, nom d'une diode?! C'est blanc! Les filtres ont-ils disparu?

Cur. — Nullement, cher ami. Mais l'intensité des sources lumineuses est ici réglée de manière que, à ouverture égale des diaphragmes, le mélange additif donne justement lieu à la sensation de lumière blanche. Rien de surprenant à cela, puisque vous savez que ce que nous percevons comme lumière blanche est, en réalité, un mélange de rayonnements de diverses couleurs. Point n'est nécessaire qu'ils couvrent tout le spectre continu des radiations visibles : trois couleurs suffisent. Et la nature elle-même semble nous engager à adopter ce procédé de *trichromie,* puisque, comme nous l'avons vu, la rétine de l'œil dispose d'éléments photosensibles affectés à chacune de ces *couleurs fondamentales* que sont le rouge, le vert et le bleu.

Ig. — D'accord pour le blanc. Mais les autres couleurs? Les obtiendrai-je également en mélangeant simplement ces trois couleurs fondamentales?

Cur. — Essayez et vous verrez.

Découverte de la saturation.



Ig. — Bon. Voyons ce que donnera le renforcement du rouge. J'ouvre un peu plus le diaphragme du rouge. Et voilà que de blanc, ma surface éclairée est passée au rose pâle. J'ouvre davantage le diaphragme rouge; mon rose devient de plus en plus intense et passe peu à peu au rouge qui, cependant, est assez pâle, même au maximum de l'ouverture du diaphragme rouge.

Cur. — C'est normal. Car il est, en quelque sorte, mélangé au blanc que procure l'addition du bleu et du vert à une partie du rouge.

Ig. — Eh bien, j'ai une idée! Pour renforcer mon rouge anémique, je vais simultanément réduire l'intensité du bleu et du vert. Regardez, Curiosus, regardez comme le rouge devient plus intense! Et maintenant qu'il n'y a plus de vert ni de bleu, il est vraiment beau.

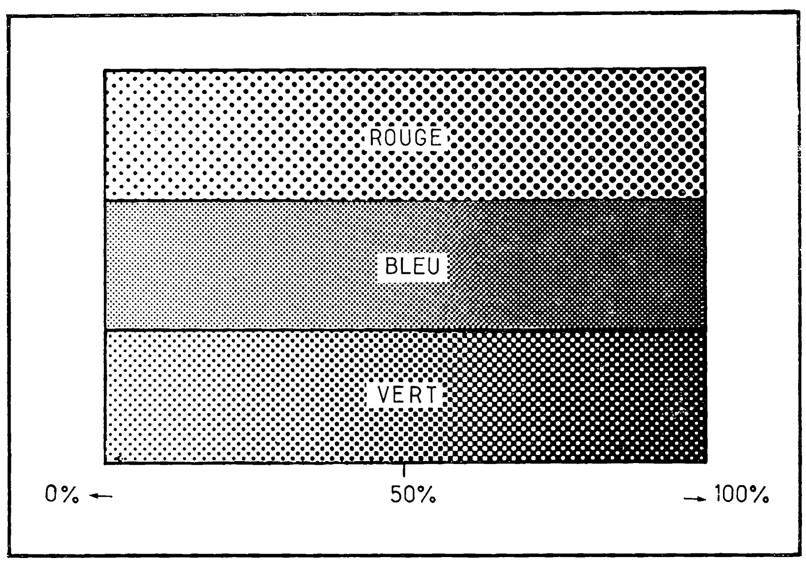
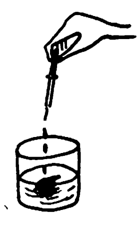


Fig. III-4. — En dosant la proportion des surfaces blanches et coloriées, on établit une échelle de saturation allant de 0 à 100 %.
(Voir cette figure en couleurs page 34.)



CUR. — Oui, votre couleur est maintenant « saturée ». On désigne, en effet, du terme *saturation* la perception du degré de pureté d'une couleur. Dans votre expérience, la teinte ne changeait pas : c'était toujours du rouge. Mais il entrait en dose plus ou moins grande dans du blanc. Vous auriez pu observer la même progression de la saturation en mettant, dans un verre d'eau, goutte à goutte, de l'encre rouge. Vous auriez vu alors l'eau rosir de plus en plus, devenir rouge pâle, puis, quand la quantité de l'encre versée aurait été nettement supérieure au volume initial de l'eau, vous auriez eu un liquide vraiment rouge.

IG. — J'aurais pu, évidemment, me livrer à la même expérience avec de l'encre violette, bleue, verte ou de tout autre teinte. Ainsi donc, si je comprends bien, la saturation est indépendante de la teinte.

CUR. — On peut obtenir pour chaque teinte toute la gamme de saturation allant de zéro à la saturation propre du colorant pur.

IG. — Je trouve que ce terme de « saturation » est très mal choisi. Dans mon esprit, il devrait désigner une limite supérieure. Ainsi parle-t-on du courant de saturation d'un tube électronique lorsque sa caractéristique présente un palier horizontal. Et je me sens « saturé » après un trop plantureux repas... Or, ici, on peut parler de saturation nulle ou de 5 ou de 10 ou de 50 ou de 100 %.

CUR. — Je reconnais que le choix du terme n'est pas des plus heureux. On emploie, mais rarement, à sa place l'expression « facteur de pureté ».

Les trois caractéristiques fondamentales.

IG. — Mais je suppose que la saturation dépend de la luminance. Plus la lumière est intense, plus la couleur devient pâle.

CUR. — Vous vous trompez, cher ami. Prenez votre verre avec de l'encre versée dans l'eau. Que vous regardiez à travers ce liquide une

lampe de 40 W ou une de 150 W, la saturation est identique. De même, vous pouvez, sur une bande de papier, tracer un réseau de minuscules taches de couleur, très rares à une extrémité, puis de plus en plus denses, pour se confondre entièrement, à l'autre bout, en une surface continue. Vu à une certaine distance, cela constitue une excellente échelle de saturation. Que vous la regardiez à la lumière d'une bougie ou à celle du soleil, les valeurs de saturation ne changent pas, alors que la luminance varie dans d'énormes proportions.

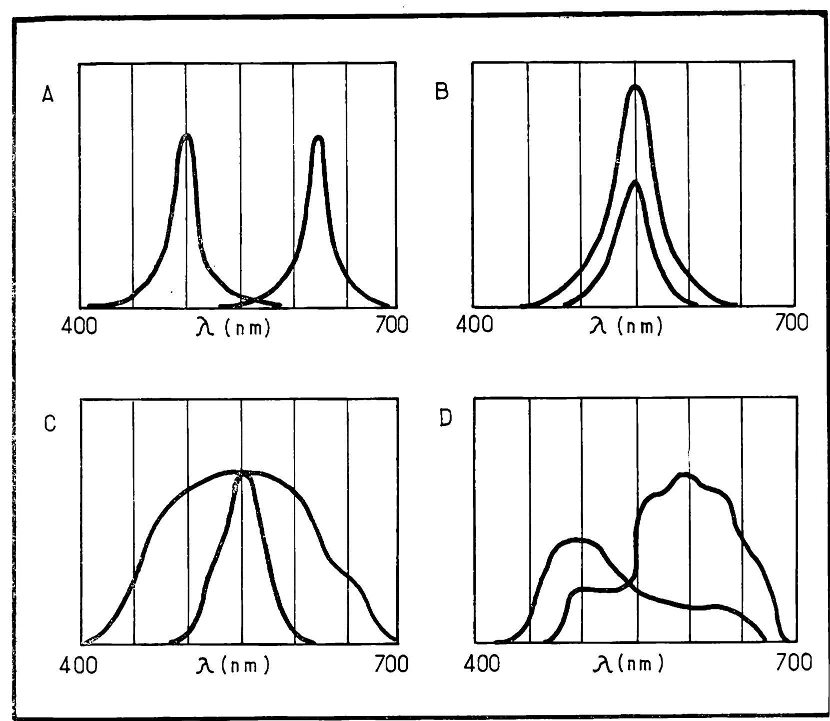
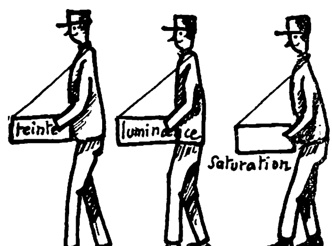


Fig. III-5. — Courbes représentatives de couleurs non monochromatiques,
A. — Les couleurs sont de teintes différentes;
B. — Les couleurs diffèrent par leur luminance;
C. — Les couleurs sont de saturations différentes;
D. — Les couleurs diffèrent à la fois par la teinte, la luminance et la saturation.



IG. — Compris. Je voudrais maintenant résumer ce que vous m'avez dit au sujet de la perception des couleurs, pour voir si tout cela s'est bien casé dans mon esprit. Trois facteurs caractérisent pour nous une couleur : la teinte, la luminance et la saturation.

La *teinte* dépend de la longueur d'onde dominante du spectre des rayons lumineux venant frapper notre œil.

La *luminance* est déterminée par la puissance de ces rayons.

La *saturation,* elle, dépend du contenu spectral de l'ensemble des rayons perçus.

CUR. — Je suis ravi de vous entendre formuler aussi clairement ces définitions. Dès lors, pourriez-vous me dire à quoi correspondent ces facteurs en représentant graphiquement le spectre des rayons?

IG. — La teinte est déterminée par la position du sommet de la courbe. La luminance par la hauteur de celle-ci. Quant à la saturation, puis-je dire qu'elle est caractérisée par la « sélectivité » plus ou moins grande de la courbe?

CUR. — Cette façon de s'exprimer manque d'élégance, mais prouve que vous avez bien tout compris. En effet, pour les couleurs saturées, la courbe est étroite et pointue, comme celle des circuits sélectifs. Une faible saturation est caractérisée par des courbes plates et étalées, semblables à celles des circuits fortement amortis.

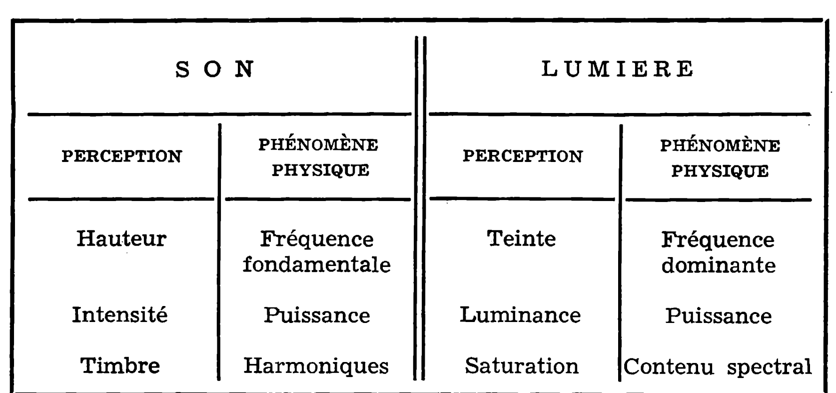
Spectacle Son et Lumière.



IG. — Curiosus! J'ai une idée formidable...

CUR. — En général, je m'en méfie. Mais aujourd'hui, vous avez l'esprit très vif. Aussi n'hésitez pas à me faire part de cette idée de génie.

IG. — Ne vous moquez pas! C'est très sérieux. Je songe à l'analogie entre les perceptions sonores et lumineuses. Car, pour le son, nous avons également trois caractéristiques : la *hauteur* (qui dépend de la fréquence fondamentale), *l'intensité sonore* ou « volume » (qui dépend de la puissance ou amplitude des vibrations) et le *timbre* (déterminé par le nombre et la puissance relative des harmoniques). Et je vous propose de résumer ces analogies dans le tableau que voici :



SON		LUMIERE	
PERCEPTION	PHÉNOMÈNE PHYSIQUE	PERCEPTION	PHÉNOMÈNE PHYSIQUE
Hauteur	Fréquence fondamentale	Teinte	Fréquence dominante
Intensité	Puissance	Luminance	Puissance
Timbre	Harmoniques	Saturation	Contenu spectral

Mélanges variés.

CUR. — Félicitations, Ignotus! Votre spectacle « Son et Lumière » me plaît beaucoup. J'espère qu'un jour votre tableau sera affiché ici, dans le passage entre les salles d'Acoustique et d'Optique. Mais, en attendant, poursuivons nos expériences de couleurs additives. Voulez-vous complètement fermer le diaphragme du bleu et mélanger le rouge et le vert.

IG. — J'obtiens du jaune! Comment est-ce possible?

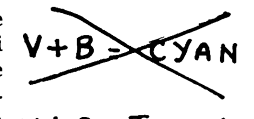
CUR. — Rien de surprenant à cela. Quand vous recevez de la lumière jaune, celle-ci agit principalement sur les cônes de la rétine

sensibles au rouge et au vert, car il n'y a pas de cônes affectés au jaune. Ici, vous produisez le même effet en procurant à ces mêmes cônes des rayons rouges et verts convenablement dosés.

IG. — Compris. Maintenant je modifie à l'aide du diaphragme les proportions du vert et du rouge et je constate que je passe par toutes les couleurs du spectre intermédiaires, y compris l'orangé.

CUR. — Mélangez maintenant le vert et le bleu en obturant le rouge. Et, là encore, selon le dosage, vous passez par toutes les couleurs intermédiaires, y compris cette teinte que l'on appelle « cyan », terme d'origine anglo-saxonne, je vous l'avais déjà dit, et auquel je préfère « turquoise ».

IG. — Et maintenant j'obture le vert et je mélange le rouge et le bleu. Cette fois-ci, ce sont diverses nuances de pourpre ou magenta qui sont ainsi obtenues. Ces teintes n'existent pas dans le spectre. Elles ne correspondent pas, vous me l'avez déjà fait comprendre, à des longueurs d'onde déterminées. Il s'agit de perceptions dues à l'excitation des cônes affectés au rouge et au bleu.



Troisième puissance de l'infini.

CUR. — Si cela continue à cette allure, on vous gardera ici, au Palais de la Découverte, comme conférencier-démonstrateur. Et, avec ce dispositif à trois projecteurs de couleurs primaires, vous pourrez, en réglant les diaphragmes, reproduire l'infinie variété des couleurs.

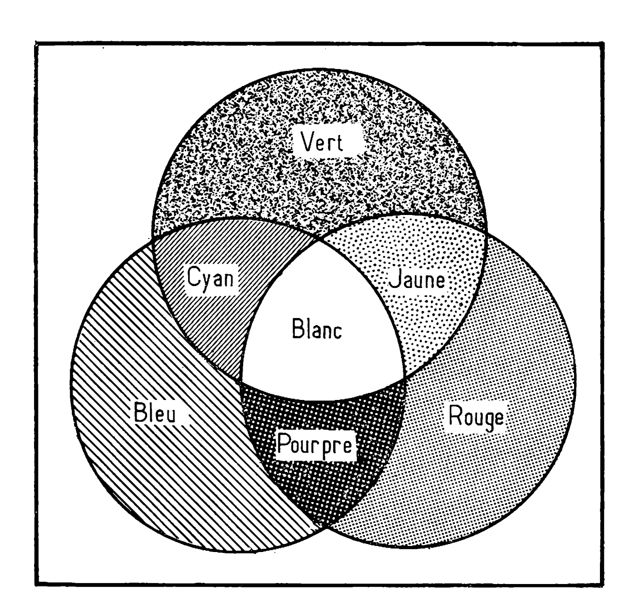
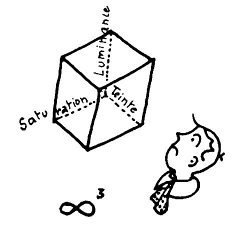


Fig. III-6. — Mélange additif des couleurs primaires. Cette figure (que l'on trouve dans tous les manuels traitant de la couleur) montre quelle est la sensation produite par la perception simultanée de deux ou de trois couleurs primaires. Il s'agit donc d'un phénomène psycho-physiologique suscité par des rayons de lumière de diverses longueurs d'onde.

(Voir cette figure en couleurs page 34.)



IG. — Je dirais même « infinité au cube », car pour chacune de l'infinité des teintes, il peut y avoir une infinité des valeurs de saturation. Et pour chacune de ces infinités au carré, il y a une infinie gradation de luminances. Pour cette « infinité au cube », il faudrait faire appel à une représentation spatiale avec trois axes de coordonnées.

CUR. — Vous n'avez que trop raison. Mais nous n'en sommes pas encore là. Ce qu'il importe surtout de tirer de cette expérience, c'est la possibilité de reproduire toute cette « infinité au cube », comme vous dites, de couleurs à l'aide de ces trois couleurs *primaires* que sont le rouge, le bleu et le vert, en les dosant convenablement. C'est le principe de la *trichromie* employée dans les divers domaines de la reproduction des images en couleurs.

IG. — Mais dites-moi, Curiosus, qu'est-ce que ce curieux cylindre transparent où l'on voit toutes les couleurs?

CUR. — C'est justement une des diverses méthodes possibles de représentation spatiale de ce que vous appelez « infinité au cube » des

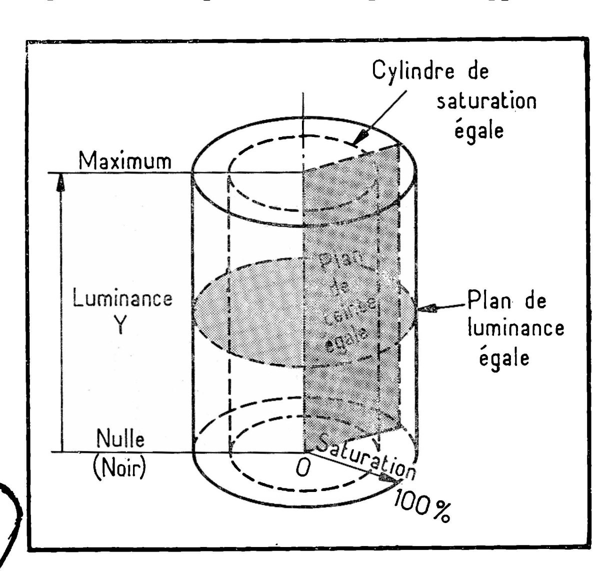


Fig. III-7. — Cylindre de Munsell représentant toutes les couleurs possibles, les luminances variant avec la hauteur, les saturations avec la distance de l'axe et la teinte avec l'angle.

couleurs. On l'appelle cylindre de MUNSELL du nom du physicien qui a imaginé cette ingénieuse façon de répartir les couleurs.

Coupons le cylindre par un plan horizontal (en fait, ce modèle est coupé en tranches comme des rondelles de saucisson). Que voyez-vous dans ce cercle? Sur la périphérie, vous avez toute la gamme des teintes allant du rouge, par l'orangé, le jaune, le vert, le bleu et le violet pour se refermer par les divers pourpres. Ce sont des couleurs saturées à 100 %. Maintenant, suivez un rayon. La saturation diminue en allant de la périphérie vers le centre où elle devient nulle; c'est dire que le centre est gris. Dans cette tranche, toutes les couleurs apparaissent avec la même luminance. Plus vous montez haut, plus la luminance est élevée, alors qu'à la base du cylindre elle est nulle, en sorte que cette base est tout bonnement noire.

IG. — C'est formidable! Nous avons donc ici toutes les combinaisons de teinte, de saturation et de luminance. Mon cube paradoxalement réalisé par un cylindre!... Je constate que, si nous le coupons à l'aide d'un plan passant par son axe et limité par cet axe, nous aurons dans ce plan toutes les saturations et luminances possibles d'une seule teinte.

CUR. — C'est tout à fait exact. Et que trouverez-vous sur une surface cylindrique ayant le même axe, mais d'un rayon plus faible?

IG. — J'aurai les couleurs de toutes les teintes possibles et de toutes les luminances, mais de saturation identique.

CUR. — Bravo! Et je vous ferai encore remarquer que l'axe du cylindre de MUNSELL représente toute l'échelle des gris allant, de bas en haut, du noir au blanc.

IG. — Que de richesse dans un volume aussi restreint! Et dire que trois couleurs primaires, convenablement dosées, permettent d'obtenir toute cette variété de couleurs grâce au principe de la trichromie.

Tout n'est qu'illusion.



CUR. — Le même principe est employé dans la photographie en couleurs et aussi, comme vous l'apprendrez, dans la télévision en couleurs. Là, les trois composantes primaires sont un rouge, un vert et un bleu dont les longueurs d'onde sont fixées à des valeurs déterminées...

Avant de quitter cette salle, Ignotus, vous ferez bien de passer un moment dans la section des « Illusions d'Optique ». Voyez par exemple, cette intense lumière rouge et dites-moi maintenant de quelle couleur est ce carré?

IG. — Il est bleu verdâtre.

CUR. — Non! Il est blanc. Mais vos cônes sensibles au rouge étaient fatigués par la lumière intense qui les impressionnait. Aussi, leur sensibilité étant momentanément réduite, avez-vous davantage réagi aux radiations bleues et vertes émanant du carré blanc... De même, ces deux carrés jaunes, de couleurs rigoureusement identiques, vous semblent très différents tout simplement parce que l'un est sur fond noir et l'autre sur fond blanc, où il paraît presque marron.

IG. — Je comprends enfin le sens profond de l'expression : « Je n'en crois pas mes yeux!... »



PLANCHES EN COULEURS

Comment traiter de la Télévision en couleurs sans présenter en couleurs certaines illustrations?

Cela paraît impossible. Aussi trouvera-t-on dans les quatre pages qui suivent ainsi qu'aux pages 70 à 72 plusieurs figures imprimées en quadrichromie.

Certaines de ces illustrations répètent d'une manière plus explicite (et plus belle...) celles qui, réalisées en noir sur blanc, sont placées aux passages correspondants du texte.

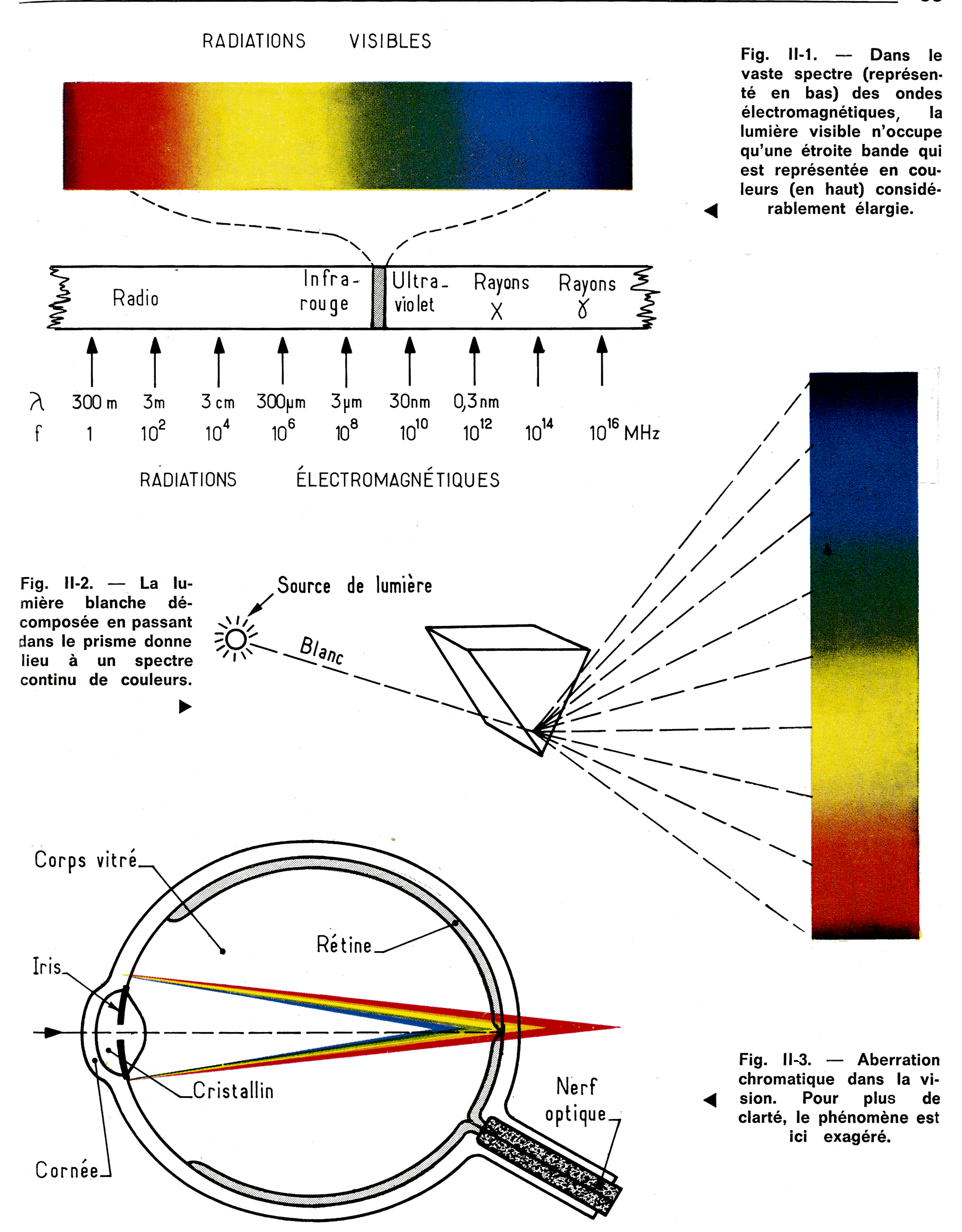


Fig. II-1. — Dans le vaste spectre (représenté en bas) des ondes électromagnétiques, la lumière visible n'occupe qu'une étroite bande qui est représentée en couleurs (en haut) considérablement élargie.

Fig. II-2. — La lumière blanche décomposée en passant dans le prisme donne lieu à un spectre continu de couleurs.

Fig. II-3. — Aberration chromatique dans la vision. Pour plus de clarté, le phénomène est ici exagéré.

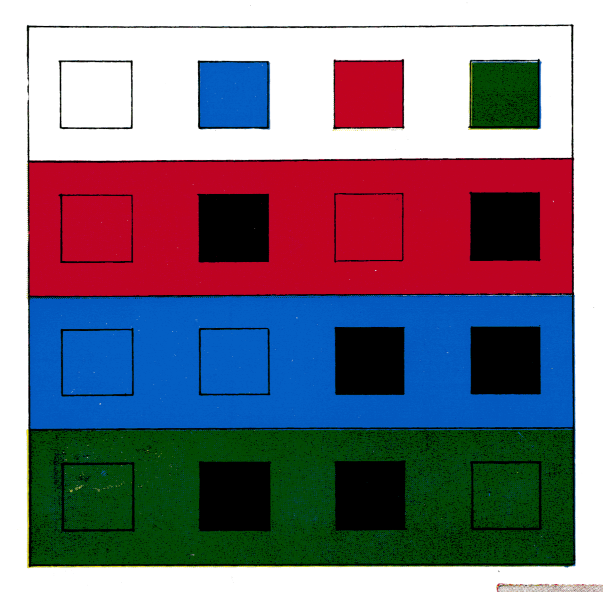


Fig. III-3. — Eclairés de lumière blanche, les quatre carrés sont blanc, bleu, rouge et vert. En lumière rouge, en lumière bleue et en lumière verte, seuls conservent leur couleur ceux de la teinte correspondante.



Fig. III-4. — En dosant la proportion des surfaces blanches et coloriées, on établit une échelle de saturation allant de 0 à 100 %.

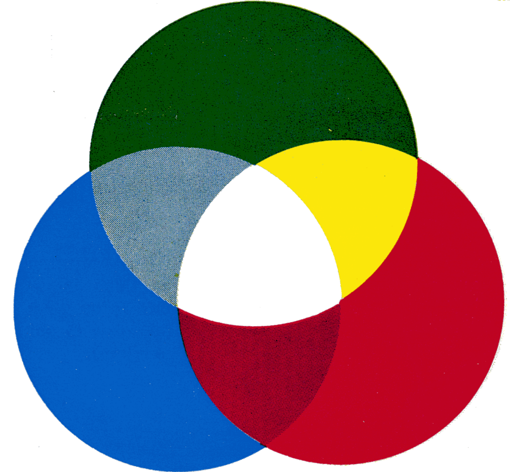


Fig. III-6. — Mélange additif des couleurs primaires. Cette figure montre la sensation produite par la perception simultanée de deux ou trois couleurs primaires. Il s'agit donc d'un phénomène psycho-physiologique suscité par des rayons de lumière de diverses longueurs d'onde.

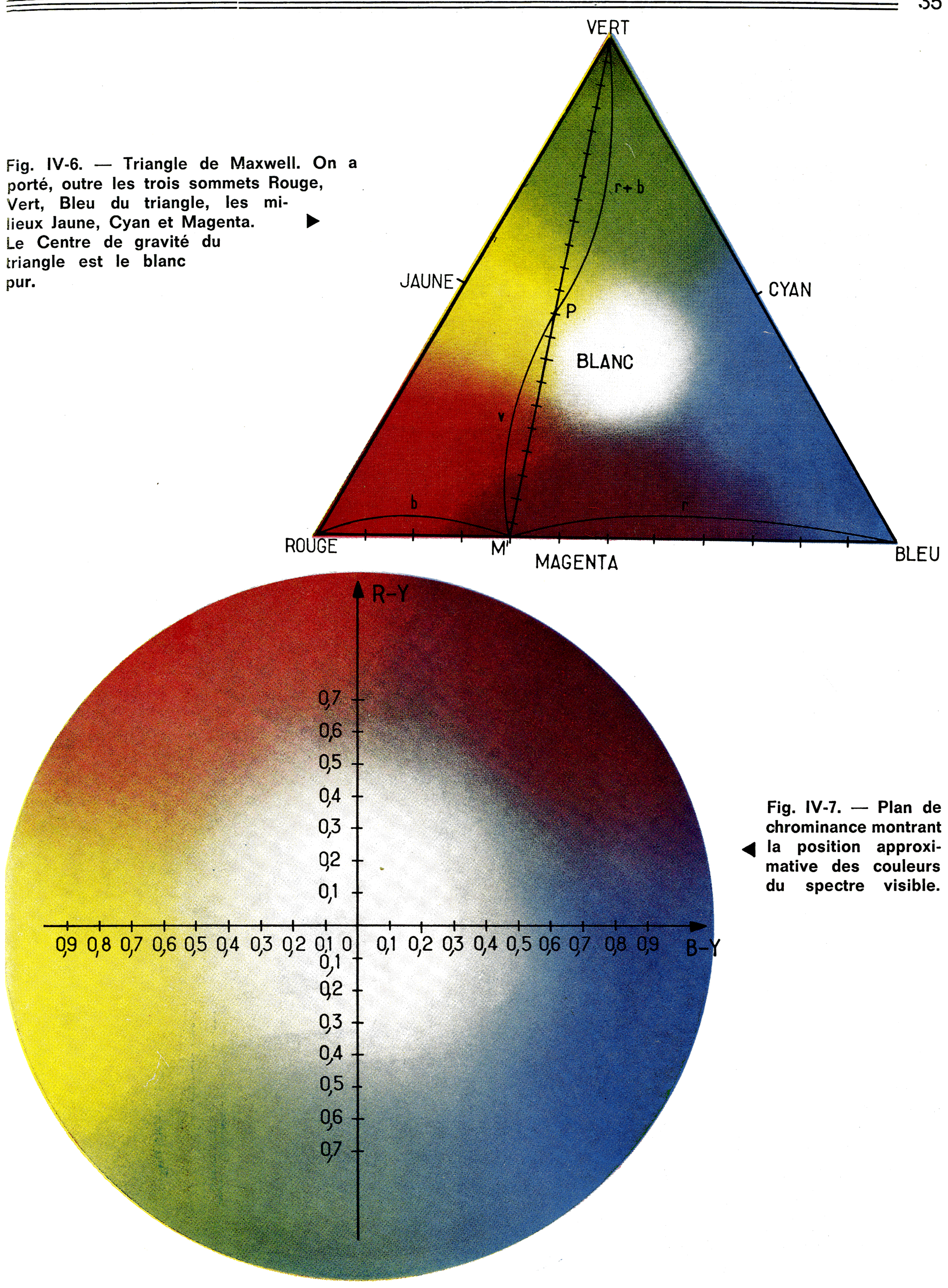


Fig. IV-6. — Triangle de Maxwell. On a porté, outre les trois sommets Rouge, Vert, Bleu du triangle, les milieux Jaune, Cyan et Magenta. Le Centre de gravité du triangle est le blanc pur. ▶

◀ **Fig. IV-7. — Plan de chrominance montrant la position approximative des couleurs du spectre visible.**

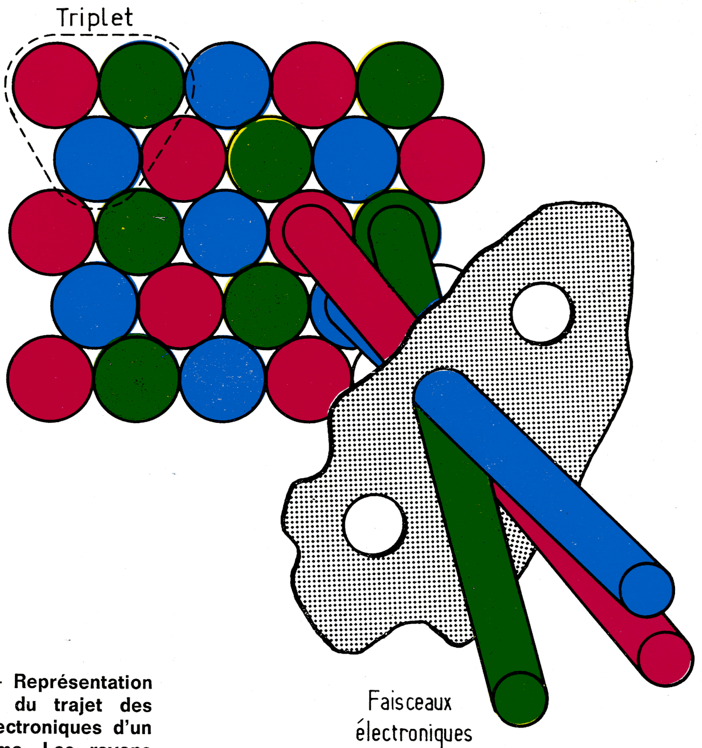


Fig. VI-6. — Représentation schématique du trajet des faisceaux électroniques d'un tube trichrome. Les rayons Rouge, Bleu et Vert traversent les trous du masque et atteignent les luminophores correspondants.

CHAPITRE IV

Comment se retrouver dans l'infinie variété des couleurs qui peuvent différer par leur teinte, leur saturation et leur luminance? La colorimétrie offre divers procédés de classification et de « repérage » des couleurs. Elle fait l'objet de ce chapitre où sont examinés les sujets suivants :

Spectrogramme. — Bichromie et trichromie. — Rôle des composantes négatives. — Représentation spatiale. — Triangle de Maxwell. — Définition de la chrominance. — Le plan chrominance. — Couleurs complémentaires. — Chrominance nulle. — Images de la saturation et de la teinte.

UN PEU DE COLORIMÉTRIE

(Extrait du livre « La Télévision en Couleurs?... C'est presque simple! » par E. AISBERG et J.-P. DOURY)

Contrairement à ce que son nom indique, la colorimétrie n'a pas pour objet la mesure de la couleur car, si, l'on s'en tient au sens strict des mots, la couleur n'est pas une grandeur mesurable : on peut définir deux couleurs identiques, mais il ne saurait être question de dire d'une couleur qu'elle est le double ou le triple d'une autre! On devrait donc plutôt dire « repérer » la couleur que la mesurer.

Car notre langage est très imprécis. Et si certaines couleurs ont des noms que les peintres connaissent bien (bleu outremer, vert Véronèse, jaune de chrome, rouge vermillon, etc.), ces noms devraient être forgés en quantité astronomique pour que l'on puisse définir les infinités de nuances que la nature nous offre. A court d'imagination poétique, les physiciens ont préféré utiliser des chiffres.

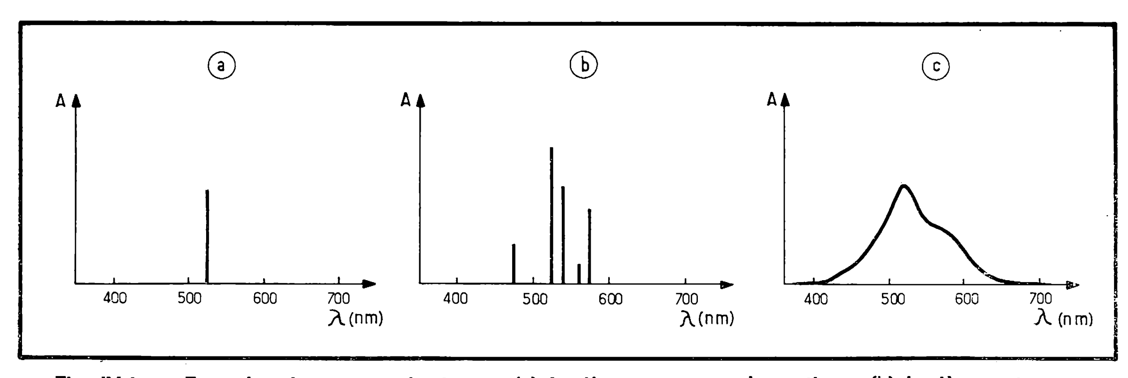


Fig. IV-1. — Exemples de spectres lumineux : (a) lumière verte monochromatique; (b) lumière verte non monochromatique (spectre de raies discrètes); (c) lumière verte non monochromatique (spectre continu de bande).

ANALYSE ET SYNTHÈSE DES COULEURS

S'il s'agit de couleurs pures ou monochromatiques, deux chiffres suffisent pour les déterminer : la fréquence (ou la longueur d'onde) et l'énergie lumineuse (ou le flux ou encore l'éclairement). Autrement dit, une couleur monochromatique est parfaitement déterminée lorsque l'on connaît l'amplitude et la position dans le spectre de la raie qui lui correspond.

Mais les couleurs de la nature ne sont jamais monochromatiques. Ce sont des mélanges de différentes longueurs d'onde, et on devrait alors donner :

— La fréquence de chaque raie;

— L'amplitude de chaque raie.

Il n'est même pas rare de trouver des couleurs naturelles dont le spectre ne soit pas discret, c'est-à-dire qui ne soit pas composé de raies distinctes, mais dont *toutes* les fréquences soient représentées avec une énergie plus ou moins grande. Pour caractériser la couleur émise selon un tel spectre de bande, on est obligé de recourir à un graphique donnant en abscisses la fréquence et en ordonnées l'amplitude — comme la courbe de bande passante d'un amplificateur.

La représentation graphique de la répartition spectrale d'une lumière s'appelle un *spectrogramme*; pour le réaliser, on utilisera un spectroscope, à prisme de verre, alimenté par la lumière à étudier et on mesurera l'intensité en différents endroits de l'échelle des fréquences à l'aide d'une cellule photo-électrique par exemple. Pour reproduire cette même lumière, on est amené à doser la puissance de sources lumineuses monochromatiques adéquates et à mélanger ces lumières élémentaires. Si l'on

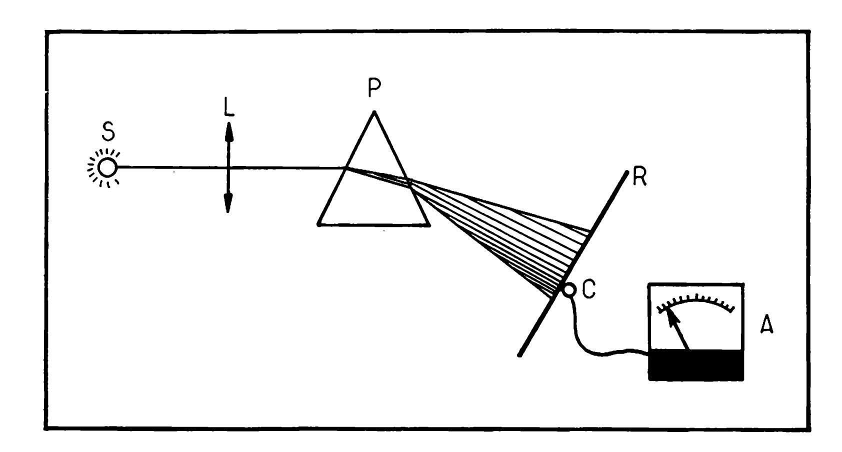


Fig. IV-2. — Analyse d'une lumière à l'aide du spectroscope à prisme. La lumière issue de la source S est focalisée sur un écran dans le plan duquel se trouve une réglette R graduée en valeurs de la longueur d'onde. Entre la lentille L qui opère cette focalisation et l'écran, un prisme de verre P disperse la lumière. Une cellule photo-électrique C raccordée à un appareil de mesure A, déplacée le long de la réglette, permet de relever le spectogramme de la lumière à étudier point par point.

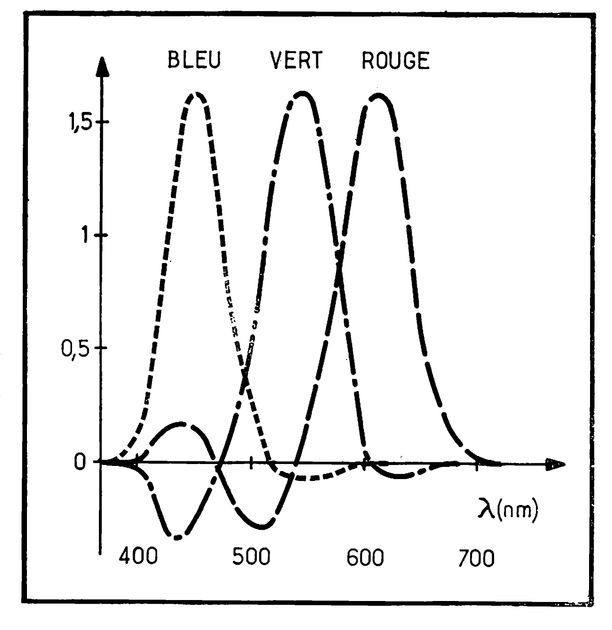


Fig. IV-3. — Dosage des couleurs primaires utilisées en TV couleurs pour reproduire diverses teintes. Les unités en ordonnées sont arbitraires (grandeurs réduites). La combinaison des trois primaires en proportions égales donne le blanc « lumière du jour ».

a effectivement affaire à un spectre de bande continu, il faudra une *infinité* de sources élémentaires pour la reproduction!...

On conçoit, par conséquent, que si *l'analyse* d'une lumière donnée, si complexe soit-elle, est toujours possible à l'aide du spectroscope, la *synthèse* est compliquée, voire impossible.

Il n'existe pas de procédé physique capable de reproduire exactement *toutes* les couleurs existantes. On doit se contenter de solutions approchées. Un procédé quelconque de reproduction des couleurs est donc toujours limité; il y aura des couleurs sacrifiées; mais, dans tous les cas, il faudra être en mesure de reproduire toute l'échelle des gris, du noir au blanc.

Si l'on analyse la lumière colorée à reproduire en un certain nombre seulement de points du spectre — qu'on appellera des couleurs *primaires* — il va de soi que :

1) La combinaison de toutes ces « primaires » en proportions égales doit conduire à l' « achromie » (c'est-à-dire le gris neutre, le blanc ou le noir);

2) Plus le nombre de primaires est grand, plus la reproduction sera fidèle.

BICHROMIE ET TRICHROMIE

Ce nombre ne peut évidemment pas être inférieur à 2 (sinon il serait impossible de faire du gris). Si l'on en prend deux, le procédé d'analyse et de reproduction s'appelle *bichromie*. Des travaux intéressants ont été effectués dans ce domaine par l'Américain Land — promoteur par ailleurs du procédé photographique « Polaroïd ». Les conclusions qu'il a tirées ont été que ce procédé était capable de conduire à des couleurs « agréables » (c'est le mot

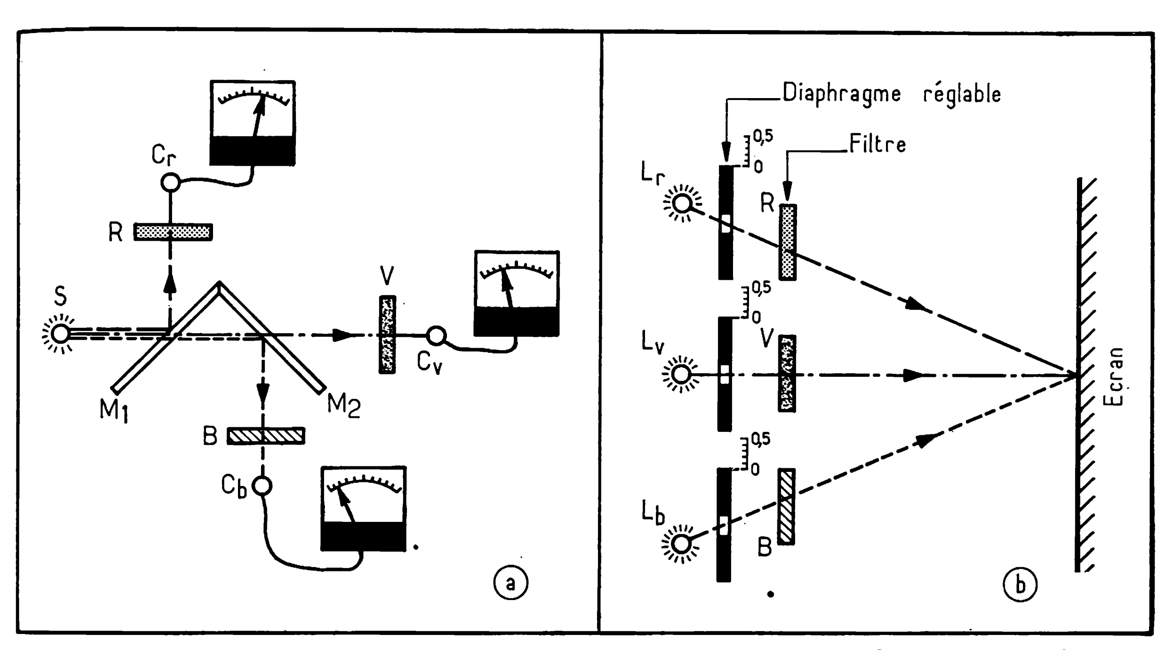


Fig. IV-4. — Analyse et synthèse d'une lumière par trichromie : (a) la source S de lumière à étudier est projetée sur trois cellules photo-électriques C_r, C_v, C_b au travers de trois filtres R, V et B par un système de miroirs semi-transparents M_1, M_2. Les courants des cellules photo-électriques sont mesurés; (b) en tenant compte de ces indications, on règle l'intensité des rayons émanants de trois lampes L_r, L_v et L_b à l'aide de diaphragmes et on les projette sur un écran E au travers de trois filtres R, V et B.

même de LAND). Mais la fidélité de reproduction ne saurait être très grande : si l'on choisit, par exemple, pour l'une des primaires un jaune-vert (pour lequel l'œil est très sensible), on devra prendre comme seconde primaire, pour pouvoir obtenir le gris, la couleur *complémentaire* du jaune-vert qui est un bleu-violet (1). Un rouge très pur est alors impossible à reproduire. On peut évidemment chercher d'autres primaires, mais, dans tous les cas, on aura un sacrifice important à faire.

L'approximation la mieux justifiée par la pratique est la *trichromie*. On utilise alors trois primaires qui sont réparties à peu près régulièrement dans le spectre : le rouge aux fréquences basses, le vert aux fréquences moyennes et le bleu aux fréquences hautes. Notons bien que ces primaires ne sont pas monochromatiques; en effet, la sélection se fait à l'aide de filtres optiques, et il est impossible de réaliser des filtres ne laissant passer qu'une seule longueur d'onde. On s'est plié, en télévision en couleurs, pour le choix des primaires, à la facilité de réalisation industrielle des luminophores de réception (voir Ch. VI).

Il faut aussi noter que toutes les couleurs ne peuvent pas être fidèlement reconstituées par l'addition pure et simple des trois primaires. Pour certaines teintes, on est conduit à opérer par soustraction, ce qui, dans le graphique de la figure IV-3, se traduit par des valeurs *négatives* des primaires. Cette figure indique quelle doit être la proportion dans laquelle chacune des primaires doit entrer dans un mélange pour procurer la sensation de telle ou telle autre teinte. Ainsi, par exemple, pour procurer la même sensation qu'une radiation ayant une longueur d'onde de 500 nanomètres, on doit additionner une faible quantité de bleu à une quantité plus grande de vert et en soustraire du rouge. Qu'est-ce à dire?

Cela signifie que, pour que la sensation produite par une radiation de 500 nanomètres puisse être reproduite, il faut d'abord la modifier en lui ajoutant une certaine quantité de rouge primaire. Dès lors, un mélange convenablement dosé de vert et de bleu procurera la même sensation que la couleur obtenue par le mélange de la radiation de 500 nm avec le rouge primaire. C'est cette quantité de rouge que l'on affecte du signe « moins » dans le mélange des trois primaires.

En pratique, le faisceau de lumière à analyser est séparé optiquement en trois et dirigé vers trois filtres qui ne laissent passer, le premier que le rouge, le second que le vert, le dernier enfin que le bleu. L'intensité lumineuse est mesurée par une cellule photo-électrique par exemple. Pour reproduire le même faisceau coloré, il faut doser l'intensité lumineuse de trois sources blanches masquées par des filtres identiques et superposer sur un écran les trois taches lumineuses.

UN PEU DE « MATHS »

En trichromie, on peut donc dire qu'une couleur quelconque est définie par sa teneur en rouge, en vert et en bleu; donc par un groupe de trois nombres. Les mathématiciens appelleraient ces trois nombres des *coordonnées* et diraient que les couleurs forment un espace à trois dimensions.

Nous sommes électroniciens et non mathématiciens, mais nous sommes reconnaissants à ces derniers de nous avoir fourni un certain nombre d'outils de travail rassemblés sous le nom de « méthodes de calcul ». Pour une fois, nous allons donc parler un peu comme les mathématiciens. Et puisque l'espace des couleurs est tridimensionnel, nous allons le représenter sous forme d'un trièdre trirectangle, les axes s'appelant OR, OV et OB.

Un point P de notre espace est donc défini par ses trois coordonnées R, V et B. Imaginons que nous multiplions par un coefficient donné k les trois coordonnées. Le vecteur $\vec{OP}$ devient $k.\vec{OP}$, c'est-à-dire que son module (on appelle ainsi sa longueur) est multiplié par k, mais que sa direction et son sens restent identiques. En pratique, cela signifie que l'intensité lumineuse a été multipliée par k sans que la qualité intrinsèque de la couleur ait été modifiée.

On conçoit donc que, si l'on veut bien dissocier ces deux aspects — intensité lumineuse et qualité intrinsèque de la couleur (qui sont perçues comme luminance

(1) On nomme *complémentaires* par définition des couleurs dont la combinaison conduit au gris neutre.

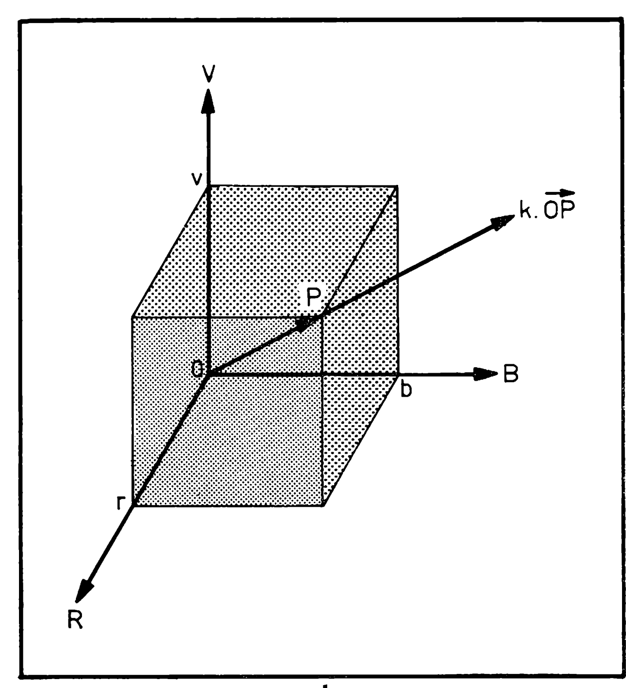


Fig. IV-5. — Espace tridimensionnel des couleurs. Le point P de l'espace des couleurs est repérable par ses coordonnées r, v et b; multiplier le vecteur $\vec{OP}$ par un facteur scalaire k revient à multiplier les trois coordonnées par k, ce qui ne change pas la qualité intrinsèque de la couleur mais seulement l'intensité lumineuse.

Fig. IV-6. — Triangle de Maxwell. On a porté outre les trois sommets R, V et B : le milieu M (Magenta) de BR; le milieu C (Cyan) de VB; le milieu J (Jaune) de RV; le centre de gravité W (Blanc) du triangle. Soit à trouver le point P caractéristique d'une couleur définie par ses trois primaires :

$$\begin{cases} R = 8 \\ V = 9{,}5 \\ B = 4 \end{cases}$$

mesurées dans la même unité. On cherche d'abord le barycentre M' de B et R en divisant RB en 12 parties égales :

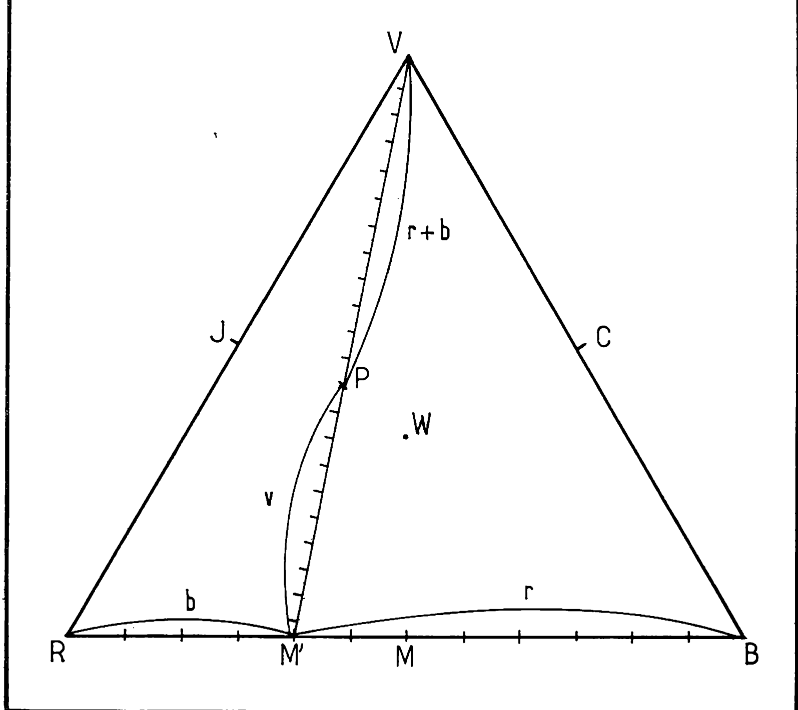
$$\begin{cases} RM' = 4 \\ BM' = 8 \end{cases}$$

puis on joint V à M' pour trouver le barycentre de l'ensemble. On divise VM' en 21,5 parties égales.

$$\begin{cases} PM' = 9{,}5 \\ VP = 12 \end{cases}$$

La couleur résutante est un jaune situé à égale distance du jaune saturé et du blanc.

(Voir cette figure en couleurs page 35.)



d'une part et teinte avec saturation d'autre part) — on pourra trouver des représentations plus simples.

Prenez un espace à trois dimensions (celui des couleurs reproductibles par la trichromie), ôtez-en une (l'intensité lumineuse), combien en reste-t-il? Juste ce qu'il faut pour faire une représentation plane, et les dessins plans sont plus faciles à lire (et à faire) que les dessins dans l'espace.

Mais nous sommes partis d'un espace rapporté à trois coordonnées R, V et B et nous parlons maintenant d'en ôter une (l'intensité lumineuse) qui est *implicitement* comprise dans ces trois-là. Allons-nous, emportés par notre ardeur mathématique, faire appel maintenant aux matrices de changement de coordonnées, voire à des opérateurs ou « êtres mathématiques » avec lesquels notre lecteur n'est peut-être pas familiarisé? Disons tout de suite qu'il y a de nombreuses façons de donner de la couleur une représentation plane sans faire de savants calculs.

TRIANGLE DE MAXWELL

Historiquement, c'est le physicien MAXWELL, bien connu par ailleurs pour avoir établi les équations différentielles de la propagation des ondes électromagnétiques, qui a dressé le premier plan de couleurs. Le *triangle de Maxwell* est un triangle équilatéral dont les trois sommets R, B et V sont respectivement caractéristiques du rouge, du bleu et du vert purs, abstraction faite de l'intensité lumineuse. Théoriquement, à l'intérieur de ce triangle, doivent se trouver toutes les teintes et toutes les saturations réalisables en trichromie.

Un point quelconque P situé à l'intérieur du triangle est caractéristique d'une couleur. Un point situé sur le côté BR par exemple caractérise une couleur qui contient du bleu et du rouge, mais pas de vert. Le point M situé au milieu de BR correspond au *magenta,* couleur complémentaire du vert; le point J, milieu de RV représente le *jaune* (complémentaire du bleu qui est au sommet opposé); et le milieu C de BV est caractéristique du *cyan* (complémentaire du rouge situé au sommet opposé). Le centre de gravité W du triangle représente la couleur composée en parties égales de rouge, de bleu et de vert, soit le blanc.

Pour déterminer la position d'un point dans le triangle, connaissant les valeurs affectées aux trois primaires, on imagine que le triangle est formé physiquement de trois barres idéales (infiniment rigides, mais sans masse) et l'on place aux trois sommets des masses proportionnelles aux valeurs des primaires : masse r en R, v en V et b en B. On recherche alors le centre de gravité de l'ensemble qui est évidemment différent du centre de gravité géométrique W du triangle. On l'appelle *barycentre.* On partage, pour commencer, le côté BR en $(b + r)$ parties égales et on place le barycentre M' à r parties du point B (c'est-à-dire à b parties du point R); on joint alors VM' que l'on partage en $r + b + v$ parties égales; et le point figuratif P de la couleur cherchée est à v parties du point M' (c'est-à-dire à $b + r$ parties du point V).

Si, inversement, on veut connaître les primaires d'un point donné P, on joint ce point à un des sommets (V par exemple); la droite VP coupe le côté opposé en M', et le rapport $\frac{M'P}{M'V}$ donne v, tandis que $\frac{PV}{M'V}$ donne $r + b$; le rapport $\frac{BM'}{M'R} = \frac{r}{b}$. Connaissant $r + b$ et $\frac{r}{b}$, on retrouve aisément r et b.

Notons que la représentation de MAXWELL ne fait qu'éluder le problème fondamental, puisque l'on conserve trois coordonnées. Son seul avantage est de conduire à des constructions géométriques dans le plan. Nous allons maintenant étudier une représentation graphique dans laquelle n'interviennent que deux coordonnées.

LUMINANCE ET CHROMINANCE SONT LES DEUX MAMELLES DE LA T.V. COULEURS

Nous verrons plus loin (ch. V) qu'il est extrêmement intéressant, en télévision en couleurs, de définir une nouvelle grandeur colorimétrique : la *chrominance.* C'est ce qu'il faut ajouter à la luminance pour obtenir l'image en couleurs complète.

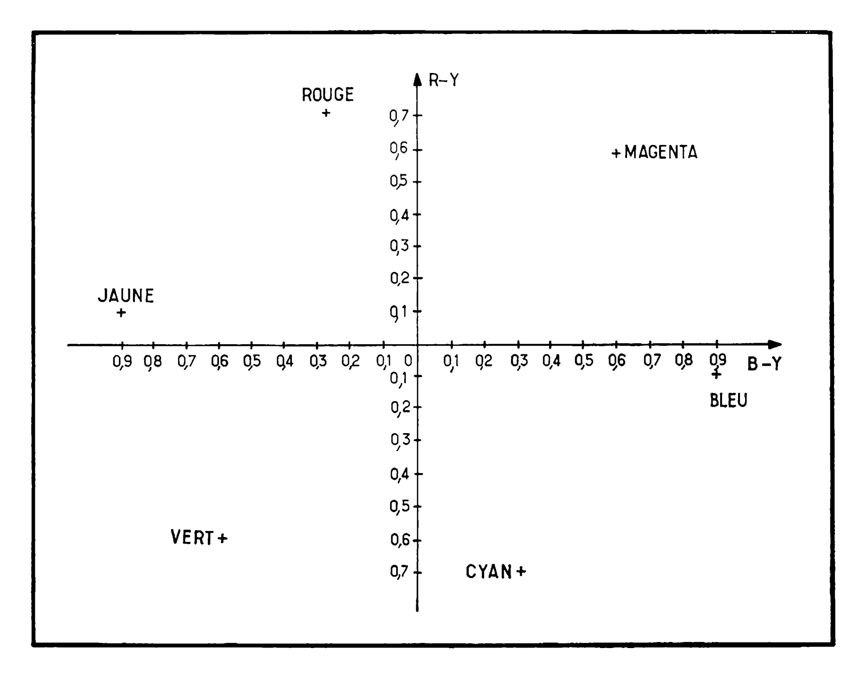


Fig. IV-7. — Plan de chrominance montrant la position des points figuratifs des couleurs primaires et de leurs complémentaires.

(Voir cette figure en couleurs page 35.)

En utilisant les primaires normalisées et en tenant compte de la sensibilité de l'œil aux différentes radiations, on exprime la luminance Y par une relation simple :

$$Y = 0{,}59\ V + 0{,}30\ R + 0{,}11\ B$$

soit approximativement

$$Y = 0{,}6\ V + 0{,}3\ R + 0{,}1\ B \quad (1)$$

Si l'on retranche Y aux trois primaires, on obtient un groupe de trois valeurs :

R — Y
V — Y
B — Y

qui définissent la *chrominance*. Celle-ci, on le constate, peut être considérée comme « couleur moins luminance ». Autrement dit : « ce qu'il faut ajouter à la luminance pour obtenir la couleur complète ». Les trois grandeurs ci-dessus ne sont pas indépendantes : si, de l'équation de définition (1), on retranche l'identité (2) que nous avons formée en décomposant Y en trois fractions (car 0,6 + 0,3 + 0,1 = 1), on obtient la relation (3)

$$\begin{array}{rll} Y = & 0{,}6\ V + 0{,}3\ R + 0{,}1\ B & (1) \\ -(Y = & +\ 0{,}6\ Y + 0{,}3\ Y + 0{,}1\ Y) & (2) \\ \hline 0 = & 0{,}6\ (V - Y) + 0{,}3\ (R - Y) + 0{,}1\ (B - Y) & (3) \end{array}$$

que l'on peut écrire sous la forme :

$$V - Y = -\frac{1}{2}(R - Y) - \frac{1}{6}(B - Y) \quad (4)$$

On peut définir un plan de chrominance rapporté à deux axes O(R — Y) et O(B — Y) et, pour chaque point figuratif dans ce plan, on saura calculer (V — Y) par la relation (4). Pour que ce plan soit valable quelle que soit la manière dont on mesure les primaires (en lux, pieds lambert ou volts de signal à la sortie des caméras), il est préférable de passer par l'intermédiaire de coordonnées sans dimensions, indiquant les grandeurs relatives (en pour cent des valeurs maximales); on désignera à partir de maintenant par RVB le *rapport* des teneurs en rouge, vert et bleu de la couleur à définir aux teneurs en rouge, vert et bleu du blanc maximal, le blanc le plus brillant dont les trois coordonnées sont par définition :

$$R = 1$$
$$V = 1$$
$$B = 1$$

Il ne saurait y avoir de valeurs de R, V ou B supérieures à 1.

NOTE. — Pourquoi choisit-on de préférence (R — Y) et (B — Y) et non pas (V — Y)?

Parce que cette dernière valeur contient moins d'information de chrominance que les deux premières. Cela ressort de l'égalité (4). On peut également constater que :

$$R - Y = -0{,}59\ V + 0{,}70\ R - 0{,}11\ B$$

$$B - Y = -0{,}59\ V - 0{,}30\ R + 0{,}89\ B$$

alors que

$$V - Y = 0{,}41\ V - 0{,}30\ R - 0{,}11\ B$$

On constate que, en valeurs absolues, les coefficients des trois composantes sont supérieurs dans les deux premières expressions, ce qui caractérise leur contenu plus riche en information de chrominance.

THÉORÈME I. — *Les signaux de chrominance de deux couleurs complémentaires sont égaux en valeur absolue et de signes opposés; les points figuratifs de deux couleurs complémentaires dans le plan de chrominance sont symétriques par rapport à l'origine.*

Soient deux couleurs définies par

$$\begin{matrix} R_1 & & R_2 \\ V_1 & \text{et} & V_2 \\ B_1 & & B_2 \end{matrix}$$

Si ces couleurs sont complémentaires additivement, la somme de leurs coordonnées est égale à celles du blanc :

et $R_1 + R_2 = 1$ (5)

$V_1 + V_2 = 1$ (6)

$B_1 + B_2 = 1$ (7)

et

$Y_1 + Y_2 = 1$ (8)

En soustrayant les équations (5) et (8), on obtient :

$$(R_1 - Y_1) + (R_2 - Y_2) = 0 \text{ ou}$$

$$R_1 - Y_1 = -(R_2 - Y_2) \quad (9)$$

La soustraction des équations (7) et (8) donne :

$$(B_1 - Y_1) + (B_2 - Y_2) = 0 \text{ ou}$$

$$B_1 - Y_1 = -(B_2 - Y_2) \quad (10)$$

Les égalités (9) et (10) définissent les coordonnées de deux points symétriquement opposés par rapport à l'origine O.

On remarquera sur le plan de chrominance que le jaune est complémentaire du bleu; le magenta celui du vert; le cyan celui du rouge.

THÉORÈME II. — *Des signaux de chrominance nuls sont caractéristiques d'un gris neutre. Le point figuratif d'un gris neutre, d'un noir ou d'un blanc est à l'origine du plan de chrominance.*

En effet :

$$R - Y = B - Y = 0$$

entraîne d'après (4)

$$V - Y = 0$$

et l'on a par conséquent :

$$R = B = V = Y$$

et nous savons qu'une couleur composée de quantités égales des trois primaires est *achrome* par définition (Loi de NEWTON).

Un gris neutre est donc parfaitement défini par sa luminance seule.

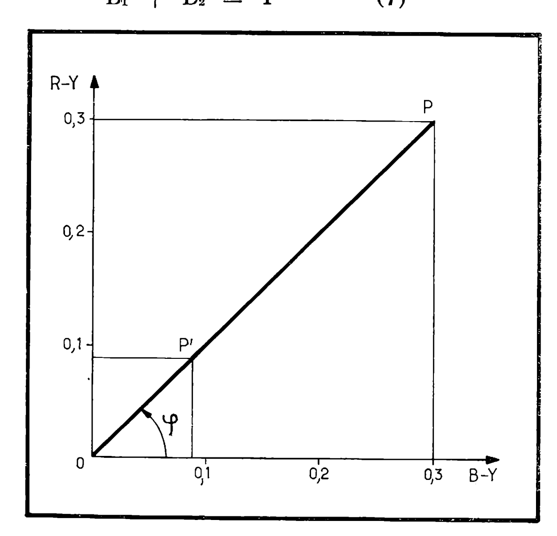


Fig. IV-8. — Plan de chrominance montrant la position d'un point figuratif d'une couleur magenta saturée :

$$P \left\{ \begin{array}{l} R = 0{,}5 \\ V = 0 \\ B = 0{,}5 \end{array} \right.$$

L'angle $\varphi = 45°$ est caractéristique de la teinte magenta. Le point P' est caractéristique d'une couleur de même teinte ($\varphi = 45°$), de même luminance (Y = 0,2), mais de saturation moindre :

$$P' \left\{ \begin{array}{l} r = 0{,}286 \\ v = 0{,}143 \\ b = 0{,}286 \end{array} \right.$$

Ces deux couleurs se déduisent l'une de l'autre par addition d'une quantité de blanc q à la plus saturée (q = 0,5) et réduction dans le rapport $(1 + \frac{q}{Y})$ des nouvelles primaires :

$$\left\{ \begin{array}{l} B - Y = 0{,}3 \\ R - Y = 0{,}3 \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} b - Y = 0{,}086 \\ r - Y = 0{,}086 \end{array} \right.$$

THÉORÈME III. — *La distance L d'un point figuratif P à l'origine O des coordonnées est une image de la saturation.*

Soit une couleur définie par :

R_1
V_1
B_1 de luminance Y_1

La distance du point P à l'origine O est :

$$L_1 = \sqrt{(R_1 - Y_1)^2 + (B_1 - Y_1)^2}$$

Si on désature cette couleur, c'est-à-dire si on lui ajoute une quantité q de blanc, ses coordonnées deviennent :

$R_1 + q$
$V_1 + q$
$B_1 + q$ de luminance $Y_1 + q$

Afin de comparer ces deux couleurs, toutes choses égales par ailleurs, multiplions les coordonnées par :

$$\frac{Y_1}{Y_1 + q} = \frac{1}{1 + q/Y_1}$$

Les deux couleurs auront alors la même luminance et ne différeront que par la saturation. Voici les nouvelles primaires :

$R_2 = (R_1 + q)/(1 + q/Y_1)$
$V_2 = (V_1 + q)/(1 + q/Y_1)$
$B_2 = (B_1 + q)/(1 + q/Y_1)$
et $Y_2 = Y_1$

Calculons les signaux de chrominance :

$$R_2 - Y_2 = \frac{R_1 + q}{1 + q/Y_1} - Y_1 = \frac{R_1 - Y_1}{1 + q/Y_1}$$

$$V_2 - Y_2 = \frac{V_1 - Y_1}{1 + q/Y_1}$$

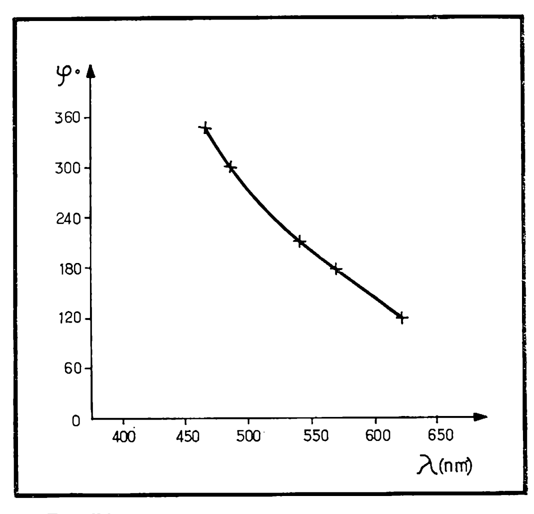


Fig. IV-9. — L'angle que fait avec l'axe horizontal un vecteur du plan de chrominance issu de l'origine est caractéristique de la teinte, c'est-à-dire de la longueur d'onde dominante de la couleur représentée. Sur ce graphique n'apparaissent pas les pourpres dont on sait qu'ils n'existent pas à l'état monochromatique (on ne saurait donc définir pour eux une longueur d'onde dominante).

$$B_2 - Y_2 = \frac{B_1 - Y_1}{1 + q/Y_1}$$

et

$$L_2 = \frac{L_1}{1 + q/Y_1}$$

Plus on ajoute de blanc, c'est-à-dire plus on désature la couleur, plus q augmente et,

Couleur	Longueur d'onde dominante (nm)	V	R	B	Y	R — Y	B — Y	tgφ	φ
BLEU	470	0	0	1	0,1	— 0,1	0,9	— 0,0111	353° 40′
CYAN	490	1	0	1	0,7	— 0,7	0,3	— 2,33	293° 30′
VERT	540	1	0	0	0,6	— 0,6	— 0,6	1	225°
JAUNE	570	1	1	0	0,9	0,1	— 0,9	— 0,111	173° 40′
ROUGE	620	0	1	0	0,3	0,7	— 0,3	— 2,33	113° 30′
MAGENTA	—	0	1	1	0,4	0,6	0,6	1	45°

à *luminance égale,* plus le point figuratif se rapproche de l'origine.

On peut donc en déduire que la distance L du point figuratif à l'origine est une image de la saturation de la couleur. Néanmoins, il ne faut pas se hâter de conclure que la distance L est proportionnelle à la saturation. Prenons en effet le cas de trois couleurs également saturées : les trois primaires.

Pour le rouge pur :

$$(R = 1, V = 0, B = 0)$$
$$Y = 0{,}3 \text{ et } L = 0{,}7.$$
$$L/Y = 2{,}34;$$

Pour le vert pur :

$$(R = 0, V = 1, B = 0)$$
$$Y = 0{,}6 \text{ et } L = 0{,}85.$$
$$L/Y = 1{,}41;$$

Pour le bleu pur :

$$(R = 0, V = 0, B = 1)$$
$$Y = 0{,}1 \text{ et } L = 0{,}9.$$
$$L/Y = 9.$$

Ce n'est que pour une *teinte* donnée que cette image est valable.

THÉORÈME IV. — *Dans le plan de chrominance, l'angle que fait avec les axes de coordonnées la demi-droite issue de l'origine O et passant par un point figuratif P est une image de la teinte.*

Désignons par φ cet angle, le point P étant défini par (R — Y) et (B — Y). Représentons maintenant, dans le plan de chrominance, les points figuratifs des couleurs primaires R, V, B et de leurs complémentaires respectives C (cyan), M (magenta) et J (jaune). Ces derniers sont bien sûr symétriques des premiers par rapport à l'origine O. Nous pouvons alors, pour les différentes couleurs, mesurer l'angle φ; nous pouvons aussi calculer les valeurs de φ en partant de la formule :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{R - Y}{B - Y}$$

Nous traçons alors la courbe $\varphi = f$ (*teinte*).

Ainsi donc, en exprimant la position de chaque point du plan de chrominance en coordonnées polaires, nous définissons explicitement sa teinte et sa saturation.

Notons que le plan de chrominance peut être considéré comme la section par un plan perpendiculaire à l'axe des luminances du cylindre des couleurs (ch. III).



CHAPITRE V

Nous retrouvons ici nos deux amis qui passent allègrement en revue les différents systèmes possibles de transmission des images en couleurs. Ils énoncent ainsi en conclusion les principes fondamentaux des divers systèmes compatibles actuellement employés. Chemin faisant, ils abordent les sujets que voici :

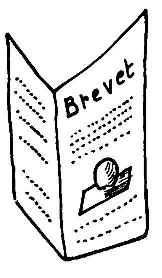
Système à trois canaux de transmission. — Emploi d'un objectif unique. — Miroirs dichroïques et filtres. — Ensemble de prise de vues. — Aberration trapézoïdale. — Trinescope. — Système à séquence des trames. — Le problème de l'encombrement du spectre de fréquences. — La double compatibilité. — Séparation des signaux de luminance et de chrominance. — Rôle de la sous-porteuse. — Bandes de fréquences allouées. — Codage et décodage.

SYSTÈMES DE TRANSMISSION

Ignotus découvre l'Amérique.

IGNOTUS. — Jusqu'à présent, Curiosus, vous m'en avez fait voir de toutes les couleurs, si je peux m'exprimer ainsi. Mais de télévision, il ne fut point question.

CURIOSUS. — Avant d'aborder le problème de la transmission des images en couleurs, ne fallait-il pas analyser en détail, comme nous l'avons fait, les différents aspects physiques et physiologiques de ce phénomène passablement complexe qu'est la couleur?



IG. — Certes. Mais je crois en savoir suffisamment pour être capable d'imaginer moi-même un système à la fois simple et efficace de télévision en couleurs. Je vais vous en exposer les principes sous le sceau du secret avant de déposer le brevet correspondant.

CUR. — Je brûle d'impatience de connaître votre dernière invention.

IG. — Elle est très simple. Mais, comme le célèbre œuf de Christophe COLOMB, il fallait y songer. Puisque l'on peut, selon le principe de la trichromie, reproduire toutes les couleurs en partant des trois fondamentales Rouge, Vert et Bleu, je préconise l'emploi, à l'émission, de trois caméras de prise de vues dont les objectifs seront pourvus de filtres de ces trois couleurs. Ainsi obtiendrons-nous des signaux vidéo correspondant aux images rouge, verte et bleue. Nous les transmettrons sur trois longueurs d'onde différentes vers trois récepteurs à projection

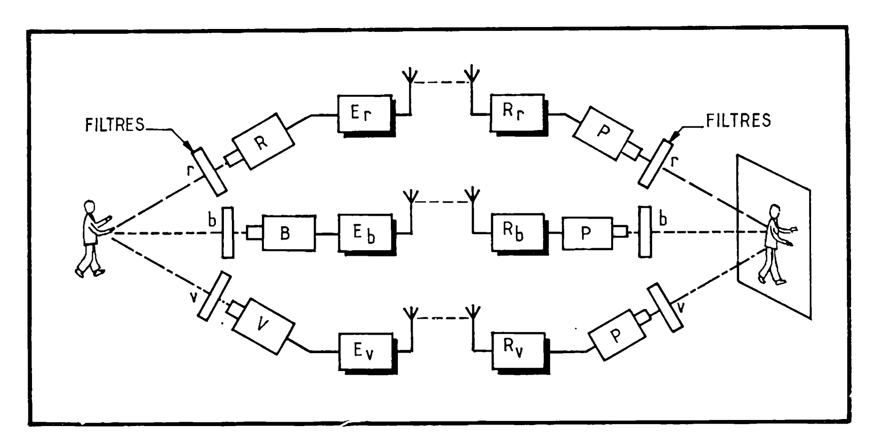
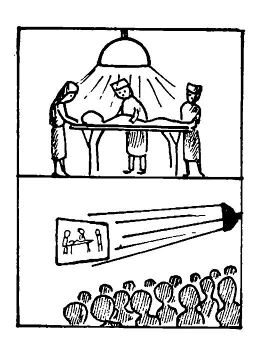


Fig. V-1. — Transmission simultanée des images des trois couleurs utilisant trois canaux complets d'émission et de réception. L'image est captée par trois caméras R, B et V pourvues de filtres rouge, bleu et vert. Leurs signaux modulent les émetteurs E_r, E_b et E_v. Les ondes ainsi émises sont captées par les récepteurs R_r, R_b et R_v et les signaux amplifiés modulent trois tubes de projection P pourvus de filtres rouge, bleu et vert, dont les images sont superposées sur un écran.



dont les objectifs seront pourvus, eux aussi, de filtres de couleurs correspondantes. En projetant les trois images sur le même écran de manière qu'elles soient rigoureusement superposées, nous obtiendrons notre image en couleurs. Et voilà!

CUR. — Une fois de plus, je dois vous décevoir en vous disant que l'on a, il y a bien longtemps, songé à un tel système.

IG. — Pauvre de moi! Que ne suis-je pas né plus tôt! On a tout inventé avant moi!... Et vous allez sans doute me dire que ce système ne vaut rien et qu'il est depuis longtemps abandonné.

CUR. — Détrompez-vous, ami. Pour des installations en circuit fermé, il est couramment employé de nos jours. Ainsi, par exemple, plusieurs centaines d'étudiants en médecine peuvent, grâce à lui, suivre, sur un écran installé dans un amphithéâtre, toutes les phases d'une opération chirurgicale, sans gêner par leur présence l'équipe qui opère. La couleur permet, en l'occurrence, de mieux visualiser ce qui se passe dans la salle d'opération. Votre idée n'est donc pas mauvaise, mais il faut y apporter certains correctifs et restrictions.

Vous préconisez l'emploi de trois caméras de prise de vues, munies chacune de son objectif et d'un filtre de couleur. Vous rendez-vous compte du fait que chacun de ces objectifs « voit » la scène à transmettre sous un angle différent?

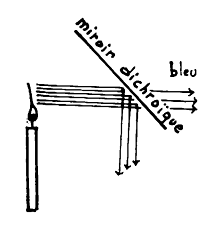
IG. — Nom d'une triode! Je n'y avais pas pensé. Nos images seront évidemment un peu différentes, surtout pour les objets figurant au premier plan, même si les trois caméras sont disposées tout près l'une de l'autre. Mais je suis sûr que vous allez m'indiquer le remède.

Trois caméras, un seul objectif.

CUR. — Il s'impose en toute logique : l'emploi d'un seul objectif. Et, ensuite, les rayons lumineux qu'il capte doivent être équitablement répartis entre les trois caméras équipées de leurs filtres de couleurs.

IG. — Facile à dire. Mais je ne vois pas comment...

Cur. — Tout simplement à l'aide d'un ensemble de miroirs réfléchissants et semi-transparents que l'on appelle aussi *dichroïques.*

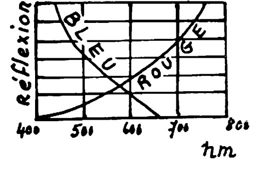


Ig. — Qu'est-ce encore que ces miroirs?

Cur. — Un miroir réfléchissant est, vous le savez, une glace dont une face est recouverte de tain formé par un amalgame de mercure et d'étain. Dans un miroir dichroïque, le tain est remplacé par un certain nombre de couches (une douzaine en moyenne) extrêmement minces (de l'ordre d'une centaine de nanomètres!) de matériaux transparents, ayant des indices de réfraction alternativement faibles et élevés. Il en résulte qu'un tel miroir réfléchit toutes les longueurs d'onde au-dessus (ou au-dessous) d'une certaine valeur tout en transmettant les autres.

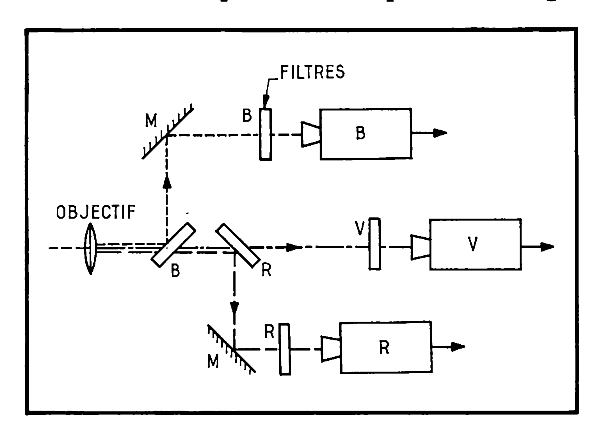
Ig. — En somme, un miroir dichroïque peut être assimilé à un filtre passe-bas ou passe-haut?

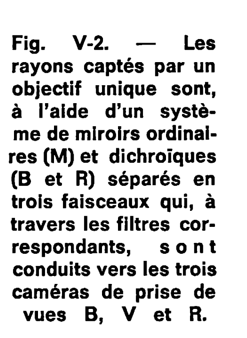
Cur. — La comparaison est justifiée. Et, comme dans les filtres électriques, il n'y a pas ici de frontières nettes entre ce qui est transmis et ce qui est réfléchi : la transition se fait progressivement. Nous appellerons « Bleu », le miroir dichroïque qui réfléchit les longueurs d'onde inférieures à 460 nm et se laisse traverser par celles supérieures à 500 nm. Le nom « Rouge » désignera celui qui réfléchit les longueurs d'onde supérieures à 580 nm et transmet celles qui sont inférieures.



Regardez maintenant la disposition de mes miroirs. La lumière venant de l'objectif tombe d'abord sur le miroir dichroïque B qui, tout en réfléchissant les rayons bleus, laissera passer les verts et les rouges. Les rayons réfléchis bleus seront, à l'aide d'un miroir ordinaire M, dirigés vers la caméra affectée au bleu qu'ils atteindront après avoir traversé un filtre bleu.

Ig. — Je vois, dès lors, que les rayons ayant traversé le miroir dichroïque B en rencontrent un autre, désigné R. Celui-ci réfléchit les rayons rouges, mais se laisse traverser par les verts qui seront dirigés



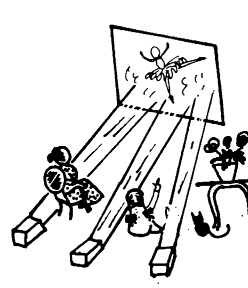

Fig. V-2. — Les rayons captés par un objectif unique sont, à l'aide d'un système de miroirs ordinaires (M) et dichroïques (B et R) séparés en trois faisceaux qui, à travers les filtres correspondants, sont conduits vers les trois caméras de prise de vues B, V et R.

vers la caméra y afférente après avoir, bien entendu, traversé un filtre vert. Quant aux rayons rouges, ils sont acheminés vers la caméra correspondante après réflexion dans un miroir ordinaire M et passage par un filtre rouge.

Cur. — C'est bien cela. Et ce que nous venons d'examiner, c'est, en principe, la composition de tous les ensembles de prises de vues employés dans les studios de télévision en couleurs. Il peut y avoir d'autres dispositions des divers miroirs; on y emploie aussi divers dispositifs optiques en vue de corriger certaines distorsions, comme par

exemple, l'astigmatisme subi par les rayons traversant les miroirs dichroïques. Mais nous n'avons pas besoin d'entrer dans ces détails. Car, à ce compte-là, je peux vous dire qu'il y a aussi une déformation qui peut se produire à la réception, lorsqu'on projette les images sur un écran.

Trois canaux de transmission.



IG. — Si elles sont bien repérées, je ne vois pas ce qui peut les déformer.

CUR. — Le rectangle de lumière émanant du projecteur situé au centre se traduira sur l'écran par un rectangle. Mais ceux qui viennent des deux projecteurs latéraux apparaîtront sur l'écran en forme de trapèzes. Rassurez-vous pourtant : les opticiens ont plus d'un tour dans leur sac et parviennent à corriger cette aberration trapézoïdale. Les électroniciens le réussissent, eux aussi.

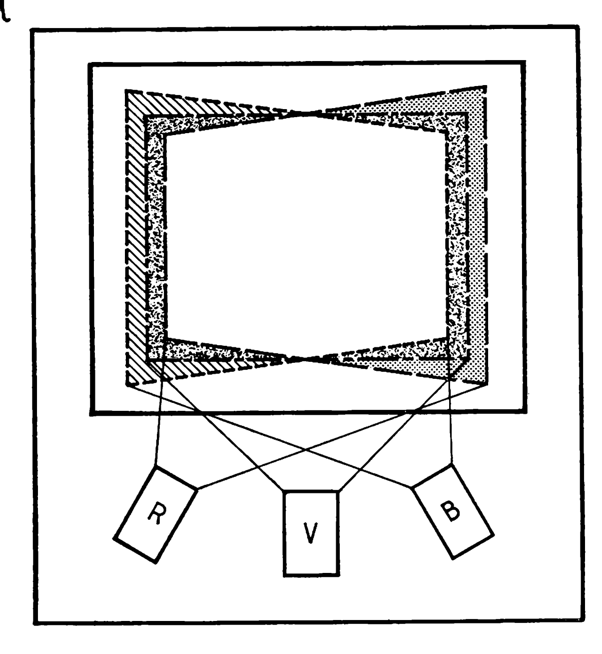


Fig. V-3. — Seul, parmi les trois projecteurs, celui placé au centre (V) ne donne pas lieu à une déformation en trapèze de l'image sur l'écran.

IG. — J'ai encore une idée. Pourquoi ne pas employer, à la réception, le même système de miroirs, ordinaires et dichroïques, que celui des caméras de prises de vues? La réversibilité des phénomènes...

CUR. — Cela se fait, Ignotus. Si l'on n'a pas besoin de projeter les images sur grand écran, on peut former les trois images sur les écrans de tubes cathodiques ordinaires, puis, à l'aide d'un système de filtres de couleurs et de miroirs, les recombiner de manière à voir l'image en couleurs. On appelle cela un « trinescope ».

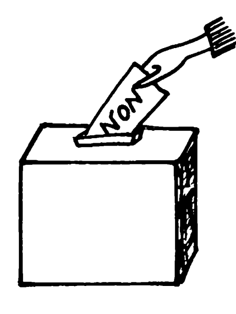
IG. — Tel que je vous connais, vous allez maintenant m'énumérer tous les inconvénients de « mon » procédé.

CUR. — Tant qu'il s'agit de transmission en circuit fermé, effectuée par fils ou câbles coaxiaux, sur une distance relativement courte, le

système est parfaitement acceptable. D'ailleurs, je vous l'ai dit, le même dispositif de prise de vues est également employé pour la radiodiffusion. Mais si vous proposez d'utiliser trois longueurs d'onde différentes comme porteuses des signaux vidéo de vos trois caméras, là on vous opposera un refus catégorique.

IG. — Je comprends : le fameux « encombrement de l'éther » dont on parle toujours, alors que, depuis belle lurette, l'hypothèse de l'éther est abandonnée.

CUR. — C'est pourtant une façon de parler bien commode. En effet, cher ami, l'espace vital dans le spectre des fréquences nous est parcimonieusement mesuré. Et si, pour un seul émetteur, vous voulez occuper la bande de fréquences de trois, vous provoquerez une violente levée de boucliers. De plus, imaginez-vous le prix et le volume d'un ensemble de réception équivalent à trois téléviseurs ordinaires?



Séquence de trames.

IG. — Ma mère n'admettra jamais pareil appareillage dans notre petit salon... Aussi me vois-je contraint de renoncer à mon projet qui, pourtant, — vous l'avez reconnu, — avait du bon. Et, puisque la transmission simultanée des trois images en couleurs fondamentales n'est guère pratique, pourquoi ne ferions-nous pas appel au principe de la transmission séquentielle proclamé par le Français Constantin SENLECQ et qui est à la base de toute la télévision monochrome? Que diriez-vous, Curiosus, d'un système où l'on transmettrait *successivement* les trois images Rouge, Verte et Bleue? A la condition de les faire suivre assez rapidement, les sensations s'additionneraient dans notre cerveau pour y reproduire les images dans leurs couleurs naturelles.

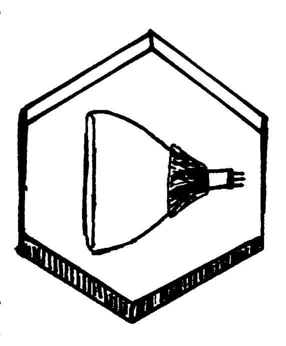
CUR. — Ce que vous proposez est non seulement réalisable, mais a été effectivement réalisé. Mieux encore : la méthode que vous préconisez, élaborée par la chaîne américaine de radiodiffusion C.B.S. (*Columbia Broadcasting System*), a été officiellement adoptée, en 1950, par la F.C.C. (*Federal Communications Commission*) qui préside, aux Etats-Unis, à tous les domaines des télécommunications.

IG. — Vous voyez que mes idées ont de la valeur! Et quel en fut le moyen pratique de réalisation?

CUR. — On transmettait successivement les trames des lignes paires et impaires dans les trois couleurs. Par exemple, dans l'ordre suivant :

1) Lignes impaires en Rouge;
2) Lignes paires en Vert;
3) Lignes impaires en Bleu;
4) Lignes paires en Rouge;
5) Lignes impaires en Vert;
6) Lignes paires en Bleu;

... et ainsi de suite...



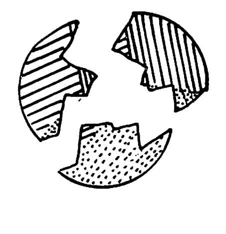
A cette fin, devant l'objectif de l'unique caméra de prise de vues, tourne un disque divisé en 6 segments constitués par des filtres R-V-B-R-V-B-. Le disque peut être remplacé par un tambour hexagonal autour du tube. L'essentiel est que la lumière passe successivement à travers des filtres des trois couleurs fondamentales.

IG. — Et quelle est la fréquence de la succession des trames?

CUR. — En Europe, nous transmettons 25 images complètes par seconde, soit 50 trames. Par conséquent, en maintenant cette fréquence, chaque tour du disque représentant 6 trames, nous devons le faire tourner à la vitesse de 50/6 soit plus de 8 tours/seconde.

Trop de défauts!

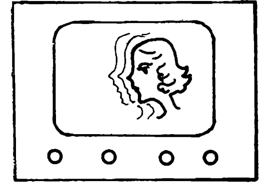
Ig. — Pas mal pour un disque qui doit être de dimensions respectables pour qu'un secteur occupant 1/6e recouvre entièrement l'écran d'un tube cathodique. Car je devine qu'à la réception un disque semblable tourne, en synchronisme avec celui de l'émission, devant l'écran du récepteur. Vous m'en avez, d'ailleurs, parlé dans votre lettre.



Cur. — Oui, cher ami, un grand disque tournant à pareille vitesse développe des forces centrifuges non négligeables. L'intrusion de la mécanique dans le royaume de l'électronique a, en tout état de cause, quelque chose de déplaisant. Mais, de surcroît, ce système offre de graves inconvénients. Songez que l'image complète, avec ses trois couleurs fondamentales et ses trames des lignes paires et impaires, est formée en un tour complet du disque, donc en 6/50 s, soit environ un huitième de seconde. Cela dépasse un peu la durée de la persistance des sensations visuelles. C'est dire que nous n'avons plus l'impression d'une vision continue : l'image se met à scintiller.

Ig. — Cela, c'est grave!

Cur. — Et ce n'est pas tout. Les personnages ou objets en mouvement sont affligés de franges colorées. Il est aisé de comprendre la cause. Supposez que, en 1/8e de seconde, l'objet se soit déplacé sur l'écran de 1 cm. Pendant ce temps, il est successivement apparu en rouge, vert, bleu, rouge, vert, bleu, sans qu'il y ait eu une superposition parfaite entre ces couleurs; c'est dire que ses contours, dans ces couleurs, sont apparus en des points décalés les uns par rapport aux autres.



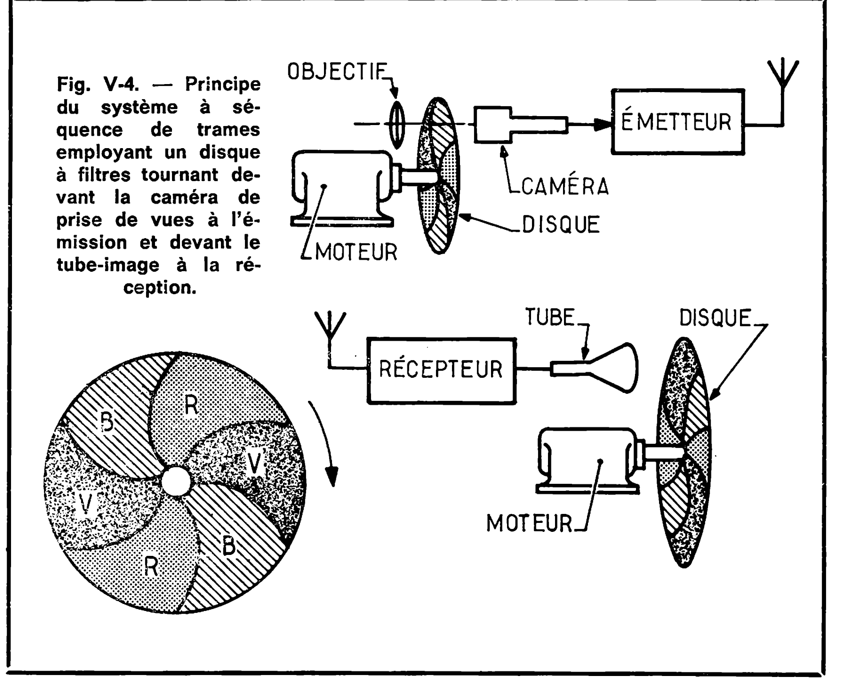


Fig. V-4. — Principe du système à séquence de trames employant un disque à filtres tournant devant la caméra de prise de vues à l'émission et devant le tube-image à la réception.

IG. — Je suppose aussi que le même phénomène doit se produire si le téléspectateur fait un rapide mouvement latéral de tête : en raison de la distance séparant les filtres colorés de l'écran, on a une parallaxe qui, elle aussi, doit se manifester par des franges de couleurs.

CUR. — Vous ne vous trompez pas, Ignotus. Et que pensez-vous de ce système, dit à *séquence de trames,* sous l'angle du fameux « encombrement de l'éther »?

IG. — Rien de bon, mais rien de mauvais non plus, car nous explorons, ici, les images à la même cadence que dans la télévision monochrome. C'est ce qui a sans doute valu à ce système de recevoir la bénédiction de la F.C.C.

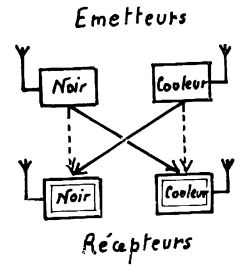
CUR. — Pas pour longtemps. Car, un an après, en 1951, la F.C.C. changea d'avis et adopta, comme norme pour la télévision en couleurs, les propositions du N.T.S.C. (*National Television System Committee*). Aussi ne mentionnerai-je que pour mémoire des projets de systèmes, conçus notamment par les chercheurs de la R.C.A. (*Radio Corporation of America*) et fondés, non plus sur la séquence de trames se succédant dans les trois couleurs fondamentales, mais sur la *séquence des lignes* et même sur la *séquence des points.* Car tous ces systèmes sont affligés d'un vice capital : *ils ne sont pas compatibles!*

IG. — C'est affreux!... Du moins, je le suppose. Car je ne sais pas du tout de quelle espèce de compatibilité il s'agit.

Conditions de la double compatibilité.

CUR. — C'est à un ingénieur français, Georges VALENSI, grand spécialiste des télécommunications et, assurément, un des plus remarquables pionniers de la télévision, que revient le mérite d'avoir, encore avant la deuxième guerre mondiale, clairement formulé les conditions de la double *compatibilité* auxquelles devrait satisfaire tout système rationnel de télévision en couleurs. Avec juste raison, VALENSI suppose que, pas plus que la photo ou le cinéma en couleurs n'ont aboli la photo et le cinéma « en noir et blanc », la télévision en couleurs ne saurait faire disparaître la télévision monochrome. Entre les deux doit s'établir un statut de « coexistence pacifique ».

En fait, dans chaque pays, lors de l'avènement des émissions en couleurs, il existe déjà des millions de foyers équipés de téléviseurs pour « noir et blanc ». Aussi, pour ne léser personne, VALENSI pose-t-il ces deux exigences fondamentales :



1) *Les programmes émis en couleurs doivent pouvoir également être correctement reçus par des récepteurs monochromes où, bien entendu, les images apparaîtront en une seule teinte (ou, comme on dit, « en noir et blanc »)* ;

2) *Les programmes émis « en noir et blanc » doivent également pouvoir être reçus par des téléviseurs polychromes où, bien entendu, les images apparaîtront en une seule teinte.*

IG. — En somme, si je comprends, ces principes de double compatibilité visent à donner à tout téléspectateur, qu'il possède un vieux téléviseur pour noir et blanc ou un récepteur moderne pour la couleur,

la possibilité de recevoir *tous les programmes,* qu'ils soient émis en couleurs ou en noir et blanc; en ce dernier cas, la réception aura, évidemment, lieu également en noir et blanc, car la plus belle fille du monde ne peut donner que ce qu'elle a.

CUR. — Je vois que vous avez saisi l'essence même du problème.

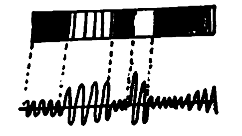
IG. — Mais ce que je vois moins clairement, c'est la solution. Il n'est sûrement pas difficile d'obtenir des images monochromes des émissions monochromes sur écran d'un téléviseur pour couleurs...

Ignotus a une idée lumineuse.

CUR. — Erreur, cher ami! C'est justement le plus difficile. Et vous verrez, par la suite, que les couleurs les plus difficiles à y reproduire, c'est le blanc pur et le noir. En ai-je vu des paysages de montagne où la neige était rose, bleue, jaune ou verdâtre, mais jamais blanche, car le récepteur n'était pas bien réglé...

IG. — Il est gentil, votre VALENSI, de poser des conditions. Encore faut-il pouvoir les remplir!

CUR. — Il est encore plus gentil que vous ne le pensez, car, tout en énonçant les principes de la compatibilité, il a préconisé les moyens permettant de les satisfaire. Et tous les systèmes actuellement adoptés sont fondés sur les idées qu'il a formulées avant la guerre. Si je me suis si longtemps appesanti sur les caractéristiques physiques des couleurs et sur leur perception, c'est pour que vous compreniez aisément la pensée fondamentale de VALENSI.



IG. — Attendez, Curiosus! Je crois en deviner un bout avant que vous me l'exposiez. Dans une image en noir et blanc (ou, pour être rigoureux, monochrome), ce qui différencie pour nous ses éléments les uns des autres est *uniquement leur luminance.* Par conséquent, pour qu'un téléviseur monochrome soit capable de capter des émissions polychromes, il faut que leur onde porteuse soit modulée par le signal vidéo de luminance, comme l'est la porteuse d'un émetteur monochrome.

CUR. — J'avoue, Ignotus, que je suis plein d'admiration pour votre puissance de raisonnement. Assurément, vous mangez beaucoup de sardines et disposez ainsi de grandes réserves de phosphore... Car ce que vous venez de dire est rigoureusement exact. Qu'il s'agisse du système NTSC américain, du SECAM né en France ou du PAL d'origine allemande, *l'onde porteuse est modulée en amplitude par le signal vidéo de luminance* qui traduit la brillance relative des éléments successivement analysés de l'image. Et le téléspectateur disposant d'un téléviseur monochrome reçoit ces images... sans, toutefois, jouir de toute la palette de couleurs dont bénéficie l'heureux possesseur du téléviseur polychrome.



IG. — Et maintenant je comprends pourquoi l'on compose le signal de luminance Y en dosant d'une manière aussi bizarre les trois signaux des couleurs primaires :

$$Y = 0{,}59\ V + 0{,}30\ R + 0{,}11\ B$$

Puisque l'œil est le plus senbile au vert et le moins au bleu, il s'agit de donner à ceux qui verront l'image monochrome (en noir et blanc) la même sensation d'intensité lumineuse qu'à ceux qui ont la chance de la contempler dans toute la richesse de ses couleurs. Aussi fait-on entrer, dans le signal de luminance, 59 % de vert, seulement 30 % de rouge et cette parcelle de bleu que sont les 11 % restants.

CUR. — Décidément, Ignotus, vous êtes dans un de vos grands jours! Il est exact que, compte tenu de la sensibilité inégale de l'œil aux diverses teintes, on a dosé les intensités des trois signaux des couleurs primaires pour que les sensations de luminance soient aussi bonnes que

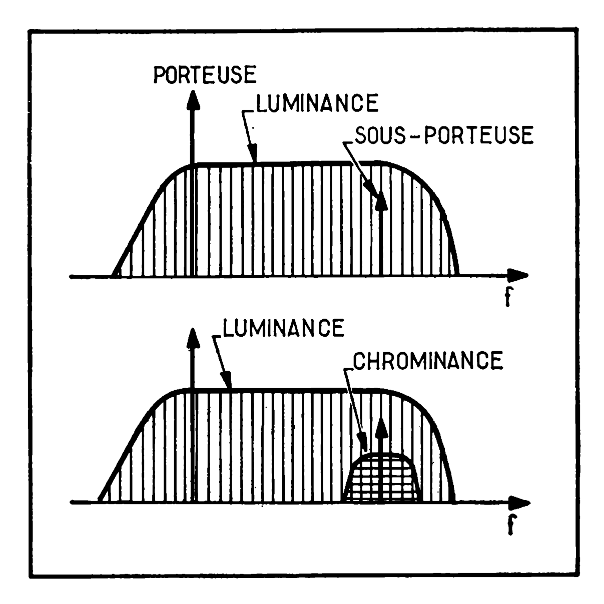


Fig. V-5. — Spectre de fréquences occupé par l'onde porteuse modulée en amplitude par la luminance et par la sous-porteuse non modulée (en haut) ou modulée par la chrominance (en bas).

lorsqu'on capte des programmes de télévision en noir et blanc. Et ces derniers programmes sont également reçus dans les meilleures conditions par un récepteur polychrome.

Porteuse et sous-porteuse.

IG. — Et de quelle façon procure-t-on à ce dernier ce supplément d'information qui ajoute des couleurs à l'image en noir et blanc?

CUR — On doit, à cette fin, émettre des signaux de *chrominance*. Je vous rappelle que ce terme désigne la sensation de teinte et de saturation due à la composition spectrale de la lumière. Le principe de la trichromie...



IG. — Vous n'allez pas me dire, Curiosus, qu'en plus de la luminance transmise sur une longueur d'onde, il en faudra trois autres pour acheminer les valeurs relatives des trois couleurs fondamentales! Que devient alors le fameux « encombrement de l'éther »?!

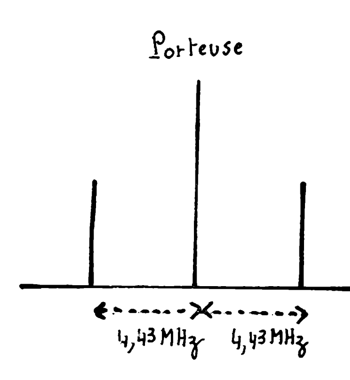
CUR. — Rassurez-vous, cher ami. Nous nous contenterons en tout et pour tout d'une seule onde porteuse. Mais nous allons l'équiper d'une sorte de bras artificiel que nous appellerons *sous-porteuse* et qui sera le messager de la chrominance.

IG. — De mieux en mieux! Qu'est-ce d'abord qu'une sous-porteuse?

CUR. — Il s'agit d'un artifice fréquemment employé dans la technique des télécommunications, notamment en téléphonie multiplex. Vous savez que les émissions de télévision sont effectuées dans les gammes

d'ondes métriques et — surtout — décimétriques dont les fréquences se mesurent en centaines de mégahertz. Vous savez aussi que les signaux vidéo occupent une bande de fréquences de plusieurs mégahertz (5 MHz dans la norme européenne du 625 lignes et 6 MHz dans la norme française). La porteuse ainsi modulée s'étale donc, de part et d'autre de sa fréquence, sur deux bandes latérales de modulation. On en supprime la majeure partie de l'une, pour réduire l'encombrement de l'émission dans le spectre des fréquences.

IG. — Tout cela, Curiosus, je le sais depuis longtemps, puisque vous me l'avez expliqué en m'enseignant la radio.



CUR. — Supposez, maintenant, que vous moduliez votre porteuse par un signal d'une seule fréquence, disons 4,43 MHz.

IG. — Eh bien, il fera apparaître juste deux fréquences latérales de modulation différant de celle de la porteuse de 4,43 MHz en plus et en moins.

CUR. — C'est juste. Nous pouvons, d'ailleurs, supprimer l'une des deux. Supposez, maintenant, que cette oscillation de 4,43 MHz, qui est justement la sous-porteuse, soit à son tour modulée par des signaux de fréquence nettement moins élevée.

IG. — Ça, c'est vicieux! Mais je pense qu'en ce cas il se formera, de part et d'autre de la fréquence de la sous-porteuse, une bande latérale de fréquences de modulation. Représentée graphiquement, une sous-porteuse pure, sinusoïdale serait un bâtonnet. Une fois modulée, elle se transforme en un rectangle plus ou moins étendu, selon la valeur des fréquences les plus élevées de la modulation.

Transmission de la chrominance.

CUR. — Mais c'est parfait, Ignotus! Je peux donc vous révéler que cette fréquence de 4,43 MHz est celle qui a été adoptée pour la norme européenne de 625 lignes en couleurs. Et l'on module cette sous-porteuse par les signaux de chrominance qui, toutefois, occupent une bande relativement étroite des fréquences.

IG. — Pourquoi?

CUR. — Parce que nous n'avons guère besoin d'avoir pour la chrominance une définition aussi élevée que pour la luminance. Souvenez-vous de cette aberration chromatique et de la répartition inégale des cônes qui diminuent le pouvoir de résolution de l'œil pour les couleurs. La discrimination des teintes et des degrés de saturation est loin d'être critique. *Ce qui détermine la finesse des détails dans les images transmises en couleurs, c'est la luminance.* Aussi est-elle transmise dans toute sa plénitude ou, du moins, avec la même largeur de bande que dans la télévision en noir et blanc. Quant à la chrominance, elle occupe une bande de fréquences suffisamment étroite pour rester dans les limites de celle de la luminance, comme vous le montre mon graphique.



IG. — Après tout, je ne vois aucun inconvénient à la diminution de la définition dans la chrominance. Je me souviens comment, dans ma lointaine enfance, je m'amusais à colorier des images imprimées en noir et blanc. Je le faisais à larges coups de gros pinceau. Mes couleurs débordaient un peu partout. Mais le résultat n'était pas mauvais, car ce qui primait c'était le dessin imprimé en noir.

CUR. — Vous voyez donc que, grâce à l'artifice de la sous-porteuse acheminant la chrominance, la bande des fréquences globale qu'occupe une émission de télévision en couleurs n'est pas plus large que celle de la télévision monochrome.

IG. — C'est, en effet, très bien. Mais je sens mille questions surgir et s'entrechoquer dans mon esprit. Comment est modulée la sous-porteuse? Comment est-elle capable de transporter les informations relatives aux trois couleurs fondamentales de la trichromie? De quelle manière...

CUR. — De grâce, arrêtez, Ignotus! Pas tout à la fois. La modulation de la sous-porteuse est effectuée en amplitude dans le NTSC et le PAL; elle se fait en fréquence dans le SECAM. Quant aux trois couleurs fondamentales, on n'en transmet que deux : le rouge et le bleu ou, plus exactement, les différences entre les signaux R et B d'une part et la luminance Y d'autre part, soit :

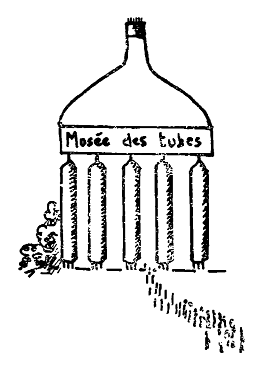
$$R - Y \qquad \text{et} \qquad B - Y$$

IG. — Mais alors vous faites seulement de la bichromie? Vous sacrifiez le vert? La couleur de l'espérance!...

CUR. — Rassurez-vous : le vert est reconstitué à la réception. N'oubliez pas que la luminance contient les *trois* couleurs. En sorte que, disposant de la luminance Y obtenue en démodulant l'onde porteuse, vous pouvez, pour commencer, retrouver les signaux R et B par simple addition des signaux :

$$Y + (R - Y) = R$$
$$Y + (B - Y) = B$$

Il ne vous reste plus qu'à soustraire ces deux signaux de Y (qui est la somme des trois signaux de couleur), pour retrouver le vert.



IG. — Cela vous paraît très simple. Mais je commence à éprouver une sorte de vertige. Et je ne vois pas comment, avec tous ces signaux, on obtiendra les couleurs à la réception.

CUR. — Pourquoi ne feriez-vous pas un tour au Musée des Tubes? Vous y trouverez la réponse à bien des questions... Sachez, en attendant, que les diverses manipulations servant à composer les signaux de luminance et de chrominance sont, à l'émission, effectuées dans un ensemble de circuits appelé *codeur*. Et, à la réception, un *décodeur* sert à extraire de ces signaux les tensions qui seront appliquées aux électrodes de cet extraordinaire engin que l'on vous montrera au Musée des Tubes.



CHAPITRE VI

Cette visite dans un musée imaginaire permettra au lecteur de se familiariser avec divers dispositifs qui ont été inventés en vue de reproduire des images en couleurs en partant de signaux qui en apportent la « traduction électrique ». Au cours de cette visite on examinera :

Projecteur à trois tubes. — Le problème de la convergence. — Le gamma. — Eidophore. — Tube à masque d'ombre. — Le problème de la pureté. — Démagnétisation. — Le tube de l'avenir.

AU MUSÉE DU TUBE ÉLECTRONIQUE

Le jeune démonstrateur s'arrêta sur le seuil d'une salle et se retourna vers le groupe d'élèves techniciens accompagnés de leur professeur. Il laissa planer, un temps, son regard sur les jeunes gens pour s'assurer qu'il n'en avait pas perdu un ou deux en contemplation devant le tube à ondes progressives ou le tube à mémoire ou bien dans la « Salle LEE DE FOREST ».

Ingénieur tout frais émoulu de l'Ecole Supérieure des Techniciens de la Télévision, il préparait une thèse dans les laboratoires du Musée International du Tube Electronique et donnait des explications aux jeunes visiteurs qu'il pilotait dans le Musée. Comme il aimait l'histoire des techniques, il s'était arrêté assez longtemps sur l'idée qu'avait eue EDISON de mettre un filament supplémentaire dans une lampe à incandescence en vue d'augmenter le rendement lumineux, ce qui avait en fait donné la *diode* et avait démarré la grande aventure de l'Electronique...

Il était jeune et s'enthousiasmait pour son métier tout neuf; il expliquait très simplement, et les élèves ne chahutaient pas : ils écoutaient attentivement et posaient même des questions.

Tous les garçons étaient là maintenant devant lui. Il dit alors :

— Nous allons pénétrer à présent dans une toute nouvelle salle : elle n'est ouverte au public que depuis huit jours. Il s'agit de la section Tubes et Méthodes Spéciales de Reproduction des Images de Télévision en Couleurs.

Il ouvrit alors, et le groupe s'engouffra dans la nouvelle salle. Le démonstrateur ferma la porte et fendit la foule, sa clef pointée en avant, en direction d'un meuble de dimensions respectables. Il prit la parole, et le brouhaha qui s'était établi pour un instant cessa aussitôt.

— Vous savez tous comment fonctionne la télévision en couleurs et vous savez qu'à la sortie du décodeur, dans le récepteur, on a à sa disposition trois signaux vidéo qui représentent respectivement le contenu en rouge, en vert et en bleu de l'image.

Il marqua un temps. Les têtes en face de lui opinaient affirmativement, tandis que le professeur cherchait, le sourcil haut levé, le cancre qui n'aurait pas su profiter de ses leçons magistrales et qui aurait ignoré ces rudiments de télévision en couleurs. Le démonstrateur reprit :

— La première idée qui vient donc à l'esprit est d'utiliser trois tubes cathodiques comme ceux des téléviseurs noir et blanc et de les alimenter respectivement avec les signaux R, V et B. Si l'on met devant le tube alimenté par le signal R un filtre rouge, devant celui alimenté par V un filtre vert et devant le tube alimenté par B un filtre bleu, on a les trois images primaires qu'il suffit de superposer par une méthode optique pour obtenir l'image en couleurs.

A nouveau, les trente têtes se baissèrent en signe de compréhension. Le jeune homme se sentait à son aise; il commençait à aimer son petit public et il était heureux

L'expérience était concluante. Pourtant, un garçon demanda la parole : « Pourquoi y a-t-il une frange verte le long du chapeau de paille? »

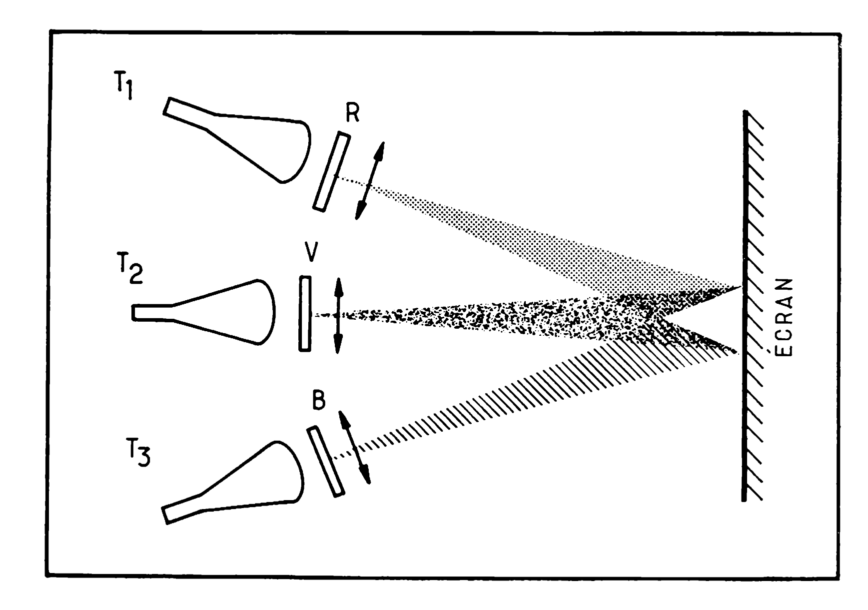


Fig. VI-1. — Projecteur trichrome. Les images des trois tubes cathodiques T_1, T_2 et T_3 sont colorées par des filtres R, V et B et projetées par trois objectifs sur un écran unique.

de pouvoir expliquer à ces esprits vierges ce qui lui était familier depuis plusieurs années.

— Pour les superposer, une méthode consiste à utiliser des tubes très actiniques et à projeter, avec des objectifs, les trois images sur un écran unique.

Il pressa un bouton devant lequel il se tenait; l'obscurité se fit graduellement, et sa blouse blanche tranchait curieusement sur la grisaille de l'appareil. Toutes les têtes se tournèrent vers un écran qui se déroulait lentement à quelques mètres du meuble. Une ravissante jeune femme coiffée d'un chapeau de paille apparaissait en couleurs sur l'écran. Le démonstrateur pressa subitement deux boutons à la fois et la jeune femme fut soudain toute verte. Un éclat de rire général salua cette performance, tandis que le professeur faisait « Chut » en souriant gauchement. Le démonstrateur attendit que le chahut eût cessé et dit :

— Ce qui vous amuse tant, c'est l'extrait vert de l'image. J'ai coupé les signaux vidéo du rouge et du bleu. Regardez maintenant le bleu seul... puis le rouge seul... et enfin l'image complète.

Et comme tout le monde riait et que le professeur fronçait les sourcils, il se repentit aussitôt d'avoir posé une question sans doute idiote. Le démonstrateur jeta un coup d'œil sur l'image et se retourna vers l'auditoire.

— Vous avez mis le doigt sur le problème constant de la reproduction des images en couleurs. C'est ce qu'on appelle le défaut de registration ou de répérage, plus couramment, de *convergence.* Vous allez comprendre tout de suite : mes trois tubes sont braqués avec leurs objectifs vers l'écran de façon que les trois axes optiques convergent au centre de l'image sur ce dernier. Mais alors que le tube cathodique dont le fond est parallèle à l'écran donne une image parfaitement rectangulaire, il y a pour les deux autres une déformation due à la parallaxe qui fait que les images sont trapézoïdales. On est donc obligé de « prédéformer » les images en agissant électriquement sur les balayages des deux tubes extrêmes et d'ajuster ces corrections pour qu'en tout point de l'écran, la géométrie des trois images projetées soit identique.

Il agit alors sur une batterie de petits

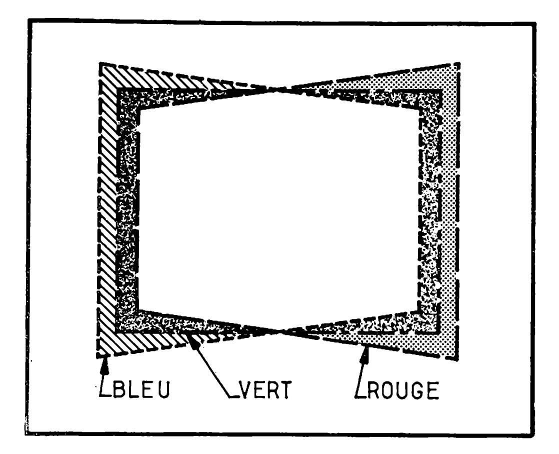


Fig. VI-2. — Défaut de convergence dû à une déformation trapézoïdale.

boutons, et l'on vit la frange verte rétrécir, puis disparaître, puis reparaître en sens inverse!

— Voyez-vous, je suis allé trop loin.

Il reprit son réglage, et l'image apparut enfin parfaitement nette.

— Notez bien qu'il faut que le contraste et la luminosité soient les mêmes sur les trois tubes de façon que l'on puisse obtenir du blanc sans dominante. Vous concevez que, si le tube rouge a un contraste ou une luminosité plus grand que les autres, on aura une dominante rouge. Mais il faut encore aller plus loin et que les gammas des trois tubes soient les mêmes, sinon on serait incapable de reproduire une échelle de gris parfaitement neutre.

Un garçon murmura — mais pas suffisamment bas pour que le professeur ne l'entendît : « Qu'est-ce que c'est que ça, le khama? » et il fut séance tenante foudroyé du regard. Mais le démonstrateur dit :

— La lumière émise par le tube cathodique n'est pas proportionnelle à la tension vidéo. Elle est de la forme

$$L = V^{\gamma}$$

et γ (lettre grecque « gamma ») dépend de la construction du canon à électrons et des tensions des électrodes. Donc, même avec des tubes de fabrication identique, il faut régler les tensions de façon que les trois caractéristiques lumière-tension soient identiques.

Il redonna alors la lumière et se dirigea vers un autre meuble, vertical celui-ci, muni à sa partie supérieure d'une sorte de hublot. Il regarda un instant dans ce hublot, puis se retourna vers les élèves :

— Au lieu de projeter sur un écran, on peut, avec un système de miroirs, superposer les trois images virtuelles, de façon que l'image en couleurs complète n'existe que dans notre œil. On peut même supprimer les filtres colorés devant les tubes, car certains miroirs, que l'on appelle *dichroïques*, ont la propriété de ne réfléchir qu'une couleur primaire et de laisser passer les deux autres. Ce sont donc des miroirs semi-transparents sélectifs; celui qui réfléchit le rouge laisse passer le bleu et le vert, celui qui réfléchit le bleu laisse passer le rouge et le vert. Vous pouvez, l'un après l'autre, venir regarder dans le moniteur dichroïque.

Et tandis que, un à un, les jeunes gens venaient contempler dans le fond du tunnel le minois de la même jeune femme au

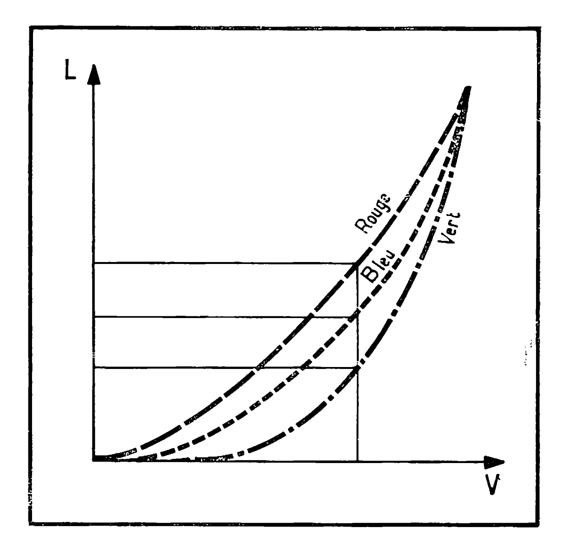


Fig. VI-3. — Caractéristiques lumière-tension des trois tubes d'un ensemble de reproduction quelconque (ou des trois canons d'un tube à masque d'ombre). Le gamma du vert est supérieur à celui du bleu qui est lui-même supérieur à celui du rouge. Bien que le noir et le blanc soient sans dominante, pour une tension donnée comprise entre zéro et la valeur correspondant au blanc, le tube rayonne plus de lumière rouge que de bleue, plus de bleue que de verte. Les gris souffrent donc d'une dominante rouge-violacée.

même chapeau de paille, le démonstrateur expliquait :

— Dans le moniteur dichroïque, les trois tubes sont symétriques par rapport à l'axe optique du système, et il n'y a donc pas de déformation trapézoïdale due à la parallaxe. Mais il peut y avoir néanmoins un défaut de convergence si les cadrages, les amplitudes ou les linéarités de balayage des trois tubes ne sont pas rigoureusement réglés de la même façon. Il y a donc, bien qu'il agisse différemment, aussi un réglage de convergence : il faut ici que la géométrie des trois tubes soit absolument identique.

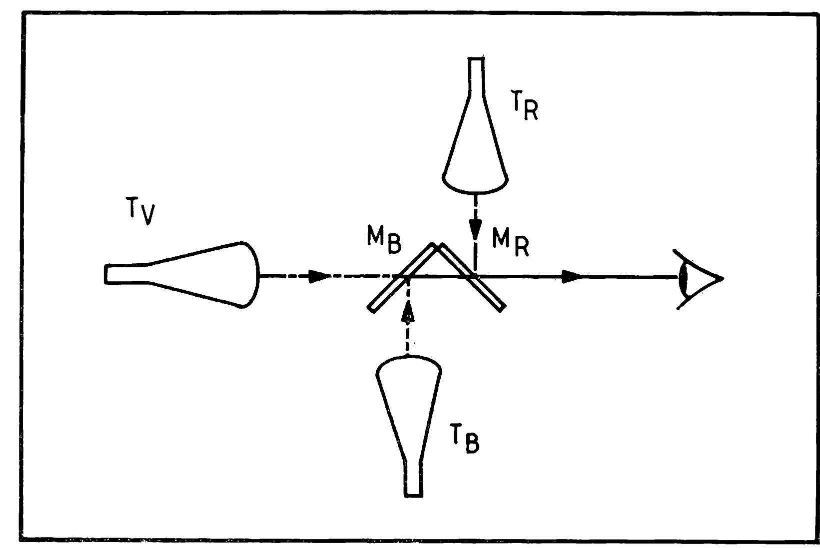


Fig. VI-4. — Moniteur dichroïque. Du tube T_B modulé par le bleu est émise une lumière blanche dont, seule, la composante bleue est réfléchie par le miroir dichroïque M_B. Cette composante traverse le miroir M_R sans encombre pour atteindre l'œil. La lumière blanche émise par le tube T_R est séparée en sa composante rouge réfléchie par M_R (qui atteint l'œil) et sa composante cyan qui traverse le miroir (et est donc perdue). Le miroir M_B ne laisse passer de la lumière émise par T_V que sa composante jaune et le miroir M_R ne laisse passer vers l'œil que la composante verte.

L'ensemble du groupe avait regardé dans le moniteur dichroïque et s'était entretenu à mi-voix des mérites respectifs du gamma et du « khama »; le démonstrateur, sans se soucier des chuchotements, s'approcha alors d'une armoire encore plus imposante que le projecteur trichrome ou le moniteur dichroïque.

— Voici un appareil qui est une adaptation à la couleur d'un projecteur noir et blanc : *l'eidophore*. En effet, on est limité en projection à partir d'une image formée sur un tube électronique par l'actinisme de la couche luminescente. Pour avoir une image très brillante qui supporte facilement l'agrandissement, il faut travailler avec des T.H.T. très importantes, et la couche se « brûle » très vite. Le grand avantage de cet appareil, dû à l'imagination du Suisse Fischer, est que son rendement lumineux est indépendant d'une couche luminescente : on peut donc projeter sur de très grands écrans. Voici quel en est le principe en noir et blanc.

« Une source de lumière intense (lampe à arc ou au xénon) est réfléchie par un miroir concave vers un écran. Ce miroir est constitué par une mince couche d'huile, nous allons voir pourquoi. Cette lumière réfléchie n'atteint pas l'écran, car elle est arrêtée en chemin par un système de grilles opaques.

« Si la couche d'huile se déforme, les rayons lumineux rencontrant le miroir à l'endroit où s'est produite la déformation, seront plus ou moins déviés par rapport à la « trajectoire » initiale et pourront traverser le système de grilles.

« Pour déformer la couche d'huile, on utilise un pinceau électronique modulé par le signal vidéo et qui vient « graver » sur le miroir la réplique de l'image à projeter.

« Pour adapter l'Eidophore à la couleur, on peut, soit utiliser trois Eidophores et des filtres (on retrouve le problème de la correction de convergence par déformation trapézoïdale), soit utiliser un système de transmission à séquence de trames, comme le système CBS, où les extraits rouge, bleu

et vert sont transmis les uns après les autres à la cadence des trames. Dans ce cas, pas de problème de convergence, mais on retrouve tous les inconvénients des systèmes séquentiels. »

Les élèves contemplaient avec stupeur ce géant de la télévision projetant une image très lumineuse sur un écran de plusieurs mètres carrés. Le démonstrateur se dirigea alors vers un grand tube cathodique « écorché », posé sur un socle sur lequel on pouvait lire : *Tube à masque d'ombre.* A côté de cette maquette, un téléviseur était en fonctionnement. Sur son écran, on distinguait l'éternelle femme au chapeau de paille, mais, comme la salle n'était plus dans l'obscurité, elle semblait beaucoup plus pâle que tout à l'heure.

— Comme il n'était pas question de mettre un moniteur dichroïque, un projecteur trichrome ou un Eidophore dans les appartements modernes (*ricanements dans l'audience...*), il a fallu trouver une autre solution. Et voici celle qui a été proposée par *RCA* : mettre les trois tubes dans la même ampoule de verre (ce qui résout le problème des balayages synchrones) et former l'image en couleurs directement sur l'écran de ce tube unique. Comme les rayons qui arrivent sur cet écran sont électroniques et non lumineux, il n'est pas question de mettre des filtres colorés sur leur parcours. En revanche, on connaît nombre de substances chimiques qui, sous l'impact d'électrons, s'illuminent et rayonnent une certaine couleur. On les appelle *luminophores,* et vous en connaissez, puisque les écrans de vos oscilloscopes sont verts ou bleus. On peut en réaliser qui correspondent aux couleurs primaires.

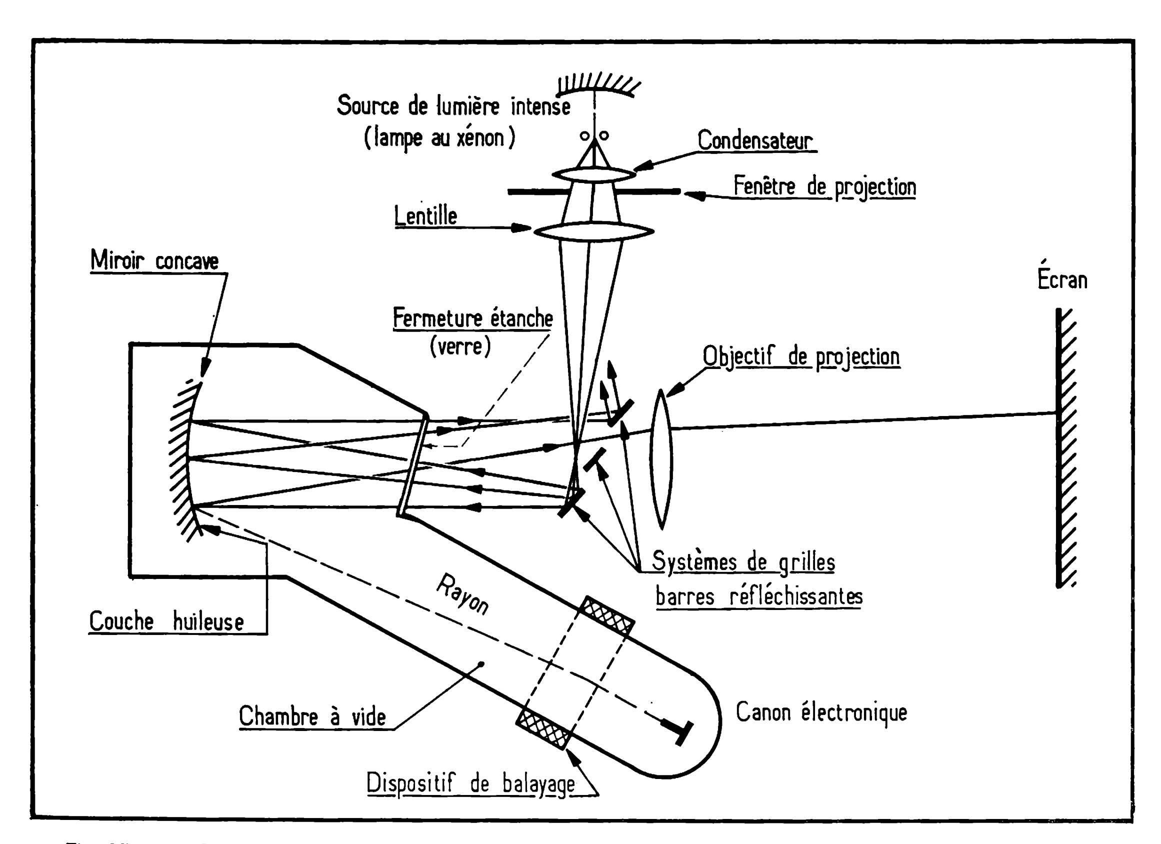


Fig. VI-5. — Coupe de l'eidophore. Un des rayons lumineux est dévié grâce au faisceau électronique modulé par le signal vidéo. Une « raclette » (non représentée ici) efface les déformations de la couche huileuse dues à la modulation à chaque trame.

« Mais comment s'assurer que le faisceau électronique dont l'intensité est modulée par le signal vidéo R rencontre effectivement la substance à luminescence rouge et pas les autres? Comment assurer l'excitation *sélective* des luminophores par les électrons?

« Pour cela on fait appel au phénomène de parallaxe, tant il est vrai que le malheur des uns fait le bonheur des autres! Très près de l'écran, on interpose sur le trajet des électrons un masque percé de trous.

Fig. VI-6. — Représentation schématique du trajet des faisceaux électroniques d'un tube trichrome. Les rayons R, V et B traversent les trous du masque et atteignent ainsi les luminophores respectifs.

(Voir cette figure en couleurs page 36.)

Les trois faisceaux d'électrons issus des trois canons passant par un trou donné vont forcément percuter l'écran en trois points différents. Il faut et il suffit qu'en ces points se trouvent des pastilles de luminophores adéquats. »

Cette péroraison ne manquait pas de grandeur dans sa rigueur mathématique. Le silence qui suivit n'était troublé que par le ronronnement des alimentations et le sifflement compliqué de grésillements des grands tubes cathodiques. Le cancre qui s'était déjà manifesté au cours de la regrettable affaire du « khama » grommela dans sa moustache naissante : « Faut l'faire. »

N'attendant pas l'inévitable réaction du public, le démonstrateur enchaîna avec force :

— Oui, il faut le faire! Et ce n'est pas commode. Car, outre le défaut de convergence (puisque les trois images primaires subissent une déformation en trapèze) qu'il faut corriger par une batterie d'aimants permanents et de bobines déformant les trajectoires électroniques, on risque d'avoir une erreur de *pureté,* inexistante dans les systèmes à trois tubes. C'est-à-dire que des électrons viennent illuminer des luminophores d'une autre couleur. Alors, il faut tourner cette bague aimantée pour rectifier le tir.

Et, comme il tournait la bague sur le tube voisin en fonctionnement, on vit apparaître une tache violette dans le ciel et une tache verte dans le bas de l'image.

Pendant qu'il opérait, le professeur examinait consciencieusement l' « écorché »; il demanda :

— Combien de trous dans le masque?

— Autant qu'il y a de points dans une image de télévision à 625 lignes, soit environ 400 000.

Un élève demanda timidement : « Que se passe-t-il si un électron n'arrive pas en face d'un trou? »

— C'est le cas de la plupart, répondit le démonstrateur. La transparence de grille n'est que de 15 %. C'est dire que 85 % des électrons émis par les cathodes ne contribuent pas à la formation de l'image parce qu'ils sont mal placés. Voilà pourquoi le courant de T.H.T. est important (1 mA); et, comme la tension est de 25 kV, vous comprenez tout de suite qu'il faudra un étage de puissance pour la réguler.

Ayant ainsi répondu à la question, il prit une grosse bobine d'inductance enroulée sur un tore de plexiglass et il la brancha dans une prise de courant.

— Voici une bobine parcourue par le courant du secteur; elle rayonne donc un certain champ magnétique alternatif; vous savez qu'un tel champ est capable de dévier les trajectoires électroniques. Alors que l'effet sur la géométrie d'un tube noir et blanc est à peine visible, parce que ce champ est très faible, un léger décalage des trajectoires dans le tube à masque suffit à fausser les couleurs, car le faisceau électronique qui devait tomber sur une pastille de luminophore rouge par exemple, va tomber à côté, sur le vert ou le bleu.

Il présenta la bobine devant l'écran, et des lignes de forces multicolores apparurent. Sans déplacer la bobine, il ôta la prise.

— Et voilà! Les parties ferreuses du téléviseur, en particulier le masque, sont magnétisées, et on ne peut plus réaliser le réglage de pureté. Même le champ magnétique terrestre aimante le tube, et on ne doit entreprendre le réglage de pureté et de convergence que lorsque le téléviseur est en position définitive par rapport au champ magnétique externe (terrestre ou artificiel). Maintenant, regardez bien : je vais démagnétiser le tube.

Il remit le courant dans la bobine et pratiqua devant l'écran un certain nombre de « passes magnétiques » en s'éloignant progressivement. Lorsqu'il fut assez loin et que les moirures colorées eurent disparu, il plaça le plan de la bobine perpendiculairement à celui de l'écran et coupa le courant. Il se tourna alors vers le groupe et dit avec un sourire triste :

— Si, plus tard, vous avez à démagnétiser des téléviseurs couleurs, ne faites jamais ce que je viens de faire... Il faut, avant tout ôter sa montre. Sinon, il faut à son tour la démagnétiser!

Des rires fusèrent, entrecoupés de remarques sur les montres antimagnétiques, de débuts d'anecdotes, vite interrompus par un rappel à l'ordre général du professeur. Le démonstrateur reprit :

— Le tube à masque est de construction complexe et coûteuse. Regardez à la loupe les petits points de luminophores rouge, bleu et vert. Il y en a un million deux cent mille répartis sur l'écran avec une très grande précision. Les circuits associés — alimentation, balayage, etc. — sont grands consommateurs de puissance, et l'image n'est pas très lumineuse. Il faut la regarder dans l'obscurité pour pouvoir en profiter pleinement. On a imaginé d'autres solutions qui n'ont pas conduit à une réalisation commerciale. Je veux parler des tubes à un seul canon à électrons.

L'étonnement se peignit sur tous les visages.

— Mais oui, on peut faire de la télévision en couleurs avec un seul canon, si ce canon est modulé par le signal rouge lorsque les électrons qu'il émet rencontrent les luminophores rouges, par le signal vert lorsqu'ils rencontrent les luminophores verts et par le signal bleu lorsqu'ils rencontrent les luminophores bleus. Il s'agit donc d'une reproduction séquentielle (séquence de points) avec commutation électronique. Vous pouvez voir ici différents modèles de tubes monocanons : chromatron, Lawrence, tube à indexation de faisceau, etc. Nous sommes maintenant un peu tenus par les exigences de votre horaire, et je ne vous les décris pas en détail. Sachez simplement que le défaut qu'ils ont en commun (bien qu'ils fonctionnent sur des principes différents), circuits associés de commutation complexes et délicats, s'oppose à leur utilisation pratique.

Le professeur dit alors : « Tout ça a l'air bien pessimiste. Vous nous citez des tubes non commercialisables, vous nous présentez des ensembles gigantesques, vous nous montrez un tube dont vous avez dit vous-même qu'il était complexe et coûteux à réaliser, qu'il souffrait de nombreux défauts bien qu'il soit, je crois, universellement répandu!... »

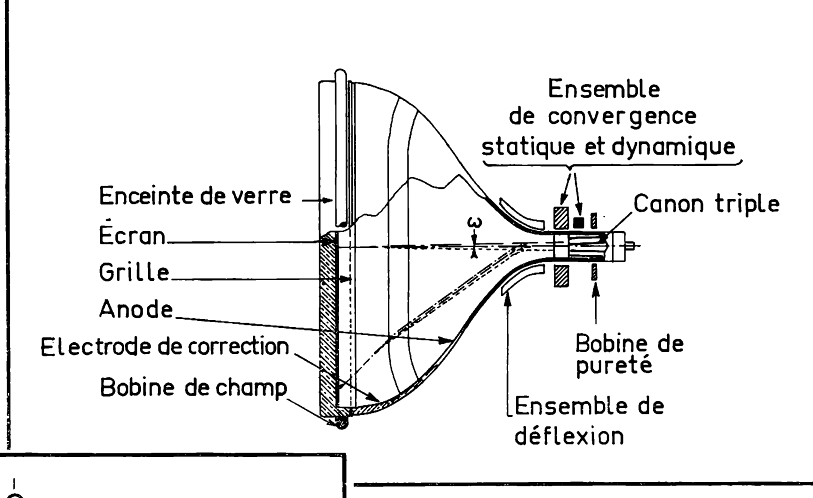


Fig. VI-7. — Vue, de dessous en coupe, du nouveau tube couleurs : les bandes de luminophores sont disposées verticalement. Trois bandes consécutives forment un triplet (bleu, vert, rouge). La grille est constituée par une nappe de fils de 0,1 mm tendus entre les bords supérieur et inférieur de l'écran.

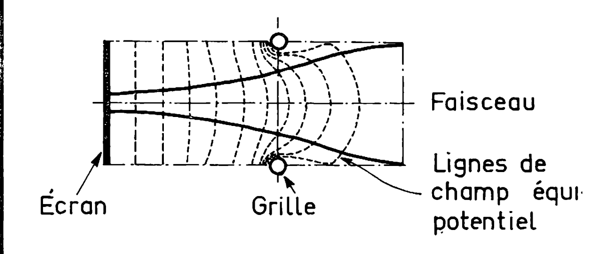


Fig. VI-8. — Principe de la post-focalisation et de la post-accélération dues à l'effet de « lentille électronique » dans l'espace grille-écran.

— Cher Monsieur, j'ai gardé le meilleur pour la fin. Vous vous doutez bien que les techniciens recherchent sans relâche, depuis des années, la solution optimale. Et je veux vous exposer à présent le fonctionnement du tube « tricanon » à grille et écran plans, qui constitue une révolution dans le domaine de la reproduction des images de télévision en couleurs. Vous connaissez la différence qu'il y a entre une chambre noire et un appareil photo?

— ???

— Dans une chambre noire, il y a un trou minuscule à la place de l'objectif. Le progrès considérable que représente l'emploi d'un objectif convergent a permis d'obtenir un meilleur rendement lumineux, puisque les rayons tombant sur toute la surface de l'objectif, surface bien supérieure à celle du petit trou, sont *tous* focalisés dans le plan de l'image. L'idée consiste donc, pour le tube cathodique trichrome, à remplacer les petits trous du masque perforé par une série de lentilles... électroniques bien sûr, puisqu'il ne s'agit plus de rayons lumineux mais de faisceaux d'électrons.

Les lentilles seront constituées par une grille de fils métalliques parallèles, portés tous au même potentiel. Le champ électrostatique existant entre deux fils parallèles focalise les électrons incidents sur des bandes de luminophores rouge, vert et bleu, parallèles aux fils de la grille et déposés sur un écran plan parallèle au plan de la grille et situé à une distance de 25 mm de celui-ci. Ces bandes sont en fait déposées directement à l'intérieur de la face avant du tube, qui est parfaitement plane, ce qui procure un excellent confort de vision.

Notons en passant que la tension des fils

de grille (600 g) directement soudés entre la face avant et le cône (afin d'éviter les fuites d'air aux traversées des fils de grille, on ceinture le tube à cet endroit d'une couche d'émail) permet la réalisation d'une face avant parfaitement plane avec une épaisseur de glace raisonnable.

Pour assurer la pureté des couleurs sur la périphérie de l'écran, on est amené à opérer une correction différentielle des trajectoires électroniques. Plutôt que de faire varier le potentiel des fils de grille (en fonction de leur distance au fil central), on préfère déposer sur le ballon une électrode supplémentaire à potentiel constant, dont le profil est calculé de façon que son action se fasse *plus longtemps* sentir pour les électrons dont la trajectoire nécessite une correction plus importante (périphérie).

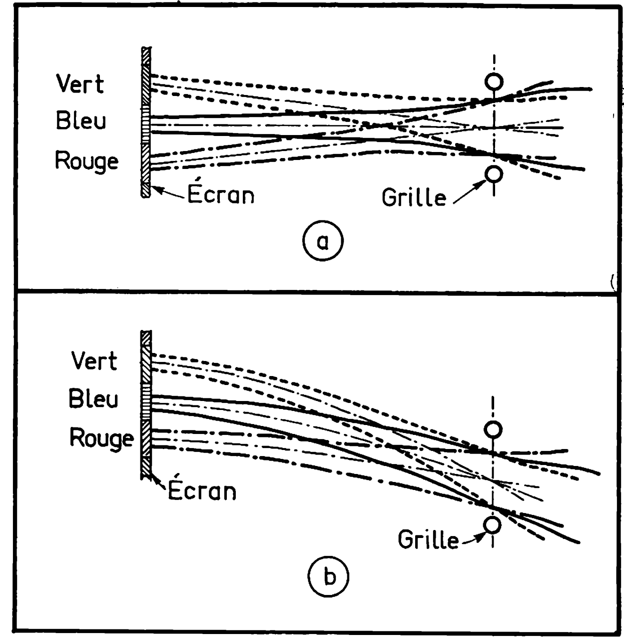


Fig. VI-9. — Chaque faisceau issu d'un des trois canons est « aiguillé » vers la bande de luminophores lui correspondant, que leur trajet soit dans l'axe du tube (a), ou en dehors de cet axe (b).

On conçoit donc — la grille n'arrêtant pas comme le masque la plupart des électrons — que ce tube d'un nouveau genre est beaucoup plus lumineux qu'un tube à masque. De même, le principe de la post-accélération permet des puissances de déflexion et des niveaux de modulations vidéo très réduits comparé à un tube à masque. D'où une simplification du téléviseur et une transistorisation complète facilitée.

Néanmoins, comme toute invention récente (les travaux ont commencé en 1960 sous la direction de Roger Cahen et se continuent depuis 1966 sous celle de Pierre Bonvalot), le tube tricanon à grille et écran plans (que l'on appelle aussi le « tube *CFT* ») nécessita une période d'études et de développements longue avant sa mise au point définitive. Depuis quelques années on en a fabriqué un très grand nombre.

La visite était terminée. Le professeur remercia chaleureusement, au nom de la classe, le jeune démonstrateur et prit congé de lui. Tout le groupe sortit du Musée International du Tube Electronique et chacun songeait, la tête encore bourdonnante d'explications et d'images de télévision en couleurs, au rapport de visite, complexe et touffu, qu'il faudrait rédiger pour la semaine suivante.



CHAPITRE VII

Dans toute la sécheresse du langage administratif, le rapport ci-après expose les grandes lignes de la composition d'un centre de diffusion de télévision en couleurs que l'on projette d'implanter dans la ville de Vidéo (que vous chercherez vainement sur la carte...). Tout y est prévu, notamment :

Caméras à trois ou quatre tubes. — Télécinéma. — Moniteurs et mélangeurs. — Emission.

CENTRE NATIONAL DE TÉLÉDIFFUSION

I. — VIDEO
2, rue de la Synchro

Monsieur l'Ingénieur Général,

J'ai l'honneur de vous soumettre le projet que j'ai établi avec mes collaborateurs pour l'installation de notre première chaîne de télévision en couleurs.

Les missions successives que nous avons accomplies, tant aux Etats-Unis qu'en Europe, dans les centres de télévision déjà équipés pour la couleur et chez les nombreux industriels producteurs des matériels correspondants, nous ont permis de dégager les grandes lignes d'une telle installation.

Il va de soi que le projet de base que je vous présente peut être modifié et complété.

En espérant que ce projet retiendra votre attention et en attendant vos instructions à ce sujet,

Je vous prie de croire, Monsieur l'Ingénieur Général, à l'expression de mes sentiments très respectueux.

Le chef des Services d'Exploitation,
(ILLISIBLE)

La télévision en couleurs n'étant qu'un perfectionnement de la télévision classique, il est hors de propos de bouleverser notre *Centre National de Télédiffusion* pour le rendre apte à produire des programmes en couleurs.

Nous proposons d'introduire progressivement la couleur sur notre réseau noir et blanc à 625 lignes en tenant compte du fait que, les systèmes modernes de transmission des couleurs étant doublement compatibles, nous pourrons transmettre et émettre des signaux couleurs sur nos équipements actuels; de même les téléspectateurs ne possédant pas de téléviseur couleurs pourront recevoir lesdits signaux sur les récepteurs traditionnels avec une qualité d'image monochrome usuelle (la visibilité des informations couleurs dans l'image de luminance est très faible).

Il faut avant tout équiper au moins un studio pour la production d'images en couleurs.

I. — CAMERAS

Les caméras de télévision en couleurs modernes sont équipées de tubes « plumbicon », sorte de vidicon très sensible et à très faible courant d'obscurité. On distingue deux types de caméras selon le nombre de tubes de prise de vues.

a) Caméras à trois tubes de prise de vues.

Dans ce cas, les rayons lumineux issus de l'objectif sont séparés en trois par un jeu de miroirs et ils viennent former une image sur la photocathode de chacun des trois tubes. Des filtres colorés spécialisent chaque tube : l'un pour le Rouge, le second pour le Vert, le dernier pour le Bleu. On peut évidemment utiliser aussi des miroirs dichroïques et ne pas mettre de filtres.

La caméra elle-même a, à peu près, les dimensions de nos caméras noir et blanc équipées de tubes image-orthicon de 4 pouces. En revanche, la baie de réglage est plus complexe, car il convient d'aligner les niveaux vidéo de trois tubes (sur le noir, les gris et le blanc) et de faire un réglage spécial : la *registration* ou *convergence*; ce réglage revient à assurer exactement les mêmes balayages (amplitudes, linéarités et cadrages) pour les trois images primaires.

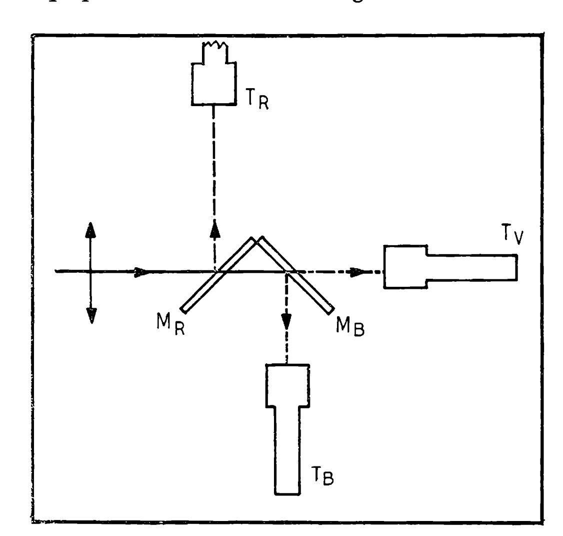


Fig. VII-1. — Caméra trichrome. La lumière ayant passé par l'objectif est séparée par le miroir dichroïque M_R en sa composante rouge qui est réfléchie vers le tube de prise de vues T_R et en sa composante complémentaire qui traverse ce miroir; l'extrait bleu est alors réfléchi vers le tube T_B par le miroir dichroïque M_B tandis que le reste (composante verte) atteint le tube T_V.

Le défaut de ces caméras provient de ce qu'un déréglage de registration entraîne une baisse de la définition, ce qui est contraire au principe de séparation des informations de luminance et de chrominance et complique le réglage.

b) Caméras à quatre tubes.

Dans ces caméras, le quatrième tube sert uniquement à analyser l'image de luminance. On peut donc dire qu'une telle caméra est composée d'une caméra noir et blanc et d'une caméra trichrome.

Le réglage de convergence, ne réagissant plus sur la définition fournie par le signal de luminance, est alors beaucoup plus simple. On peut comparer cette technique à celle de la quadrichromie où les imprimeurs, après avoir superposé les trois images primaires, font une quatrième « passe » de noir où apparaissent tous les détails fins de l'image et qui masque les éventuels défauts de « registre » ou *repérage*, pour employer le terme d'imprimerie.

II. — TELECINEMAS

Les techniques utilisées en noir et blanc peuvent être démarquées pour la couleur : télécinéma utilisant une caméra (il faudra 3 ou 4 tubes de prise de vues et les filtres adéquats au lieu d'un seul tube) ou bien télécinéma à éclairage balayé (« *flying spot* ») et, dans ce cas, il faudra un triple ensemble de cellules photoélectriques et de photomultiplicateurs.

Les deux techniques sont également utilisées dans les analyseurs de documents diapositifs ou opaques. La seconde a le gros avantage de supprimer le réglage de convergence.

III. — EXPLOITATION, REGIE

Alors que les sources d'images en couleurs sont indépendantes du système de transmission, les équipements de régie en sont généralement caractéristiques.

A chaque source d'images, on associe un *codeur.* Cet appareil permet, à partir des informations primaires, un « multiplexage » en un signal unique, dit *signal complexe,* qui comprend implicitement le signal vidéo noir et blanc classique et une sous-porteuse à haute fréquence modulée par les signaux de chrominance.

Chaque signal complexe est contrôlable en permanence à l'aide d'un *moniteur* tout à fait différent de ceux dont nous disposons pour notre exploitation en noir et blanc : il est muni d'un tube-image spécial, capable de reproduire les couleurs, et sa partie vidéo est remplacée par un *décodeur* qui, à partir du signal complexe, restitue les signaux primaires.

Les transitions entre images par fondus (à la fermeture, à l'ouverture, enchaînés) ou effets spéciaux (volets, incrustation d'une image dans une autre selon le profil d'une troisième ou d'une forme géométrique, etc.) demandent une technique plus élaborée qu'en noir et blanc, et il existe des *mélangeurs* qui, associés à un classique générateur d'effets, permettent la réalisation en couleurs de tous les trucages connus.

En ce qui concerne l'enregistrement magnétique, tous les systèmes ne sont pas équivalents, mais il y en a au moins un qui est compatible avec les magnétoscopes noir et blanc dont nous disposons, sans équipements additionnels. Le signal complexe est enregistré directement au lieu et place du signal vidéo traditionnel.

IV. — TRANSMISSIONS

Des expériences intéressantes ont eu lieu en Europe il y a plus d'une dizaine d'années, montrant que la transmission par câbles ou faisceaux hertziens à grande distance sur des réseaux différents (Eurovision et Intervision), ainsi que par satellites artificiels des signaux de télévision en couleurs est parfaitement possible et conduit même à d'excellents résultats.

Etant donné les caractéristiques de nos lignes de transmission, de nos émetteurs et de nos réémetteurs, le *Centre National de Télédiffusion* pourrait commencer l'exploitation de notre première chaîne de télévision en couleurs dès l'achat du studio minimal, c'est-à-dire de deux caméras, d'un télécinéma, des trois codeurs associés, d'un mélangeur et de quatre moniteurs (le quatrième servant au contrôle final de l'image mise sur antenne).



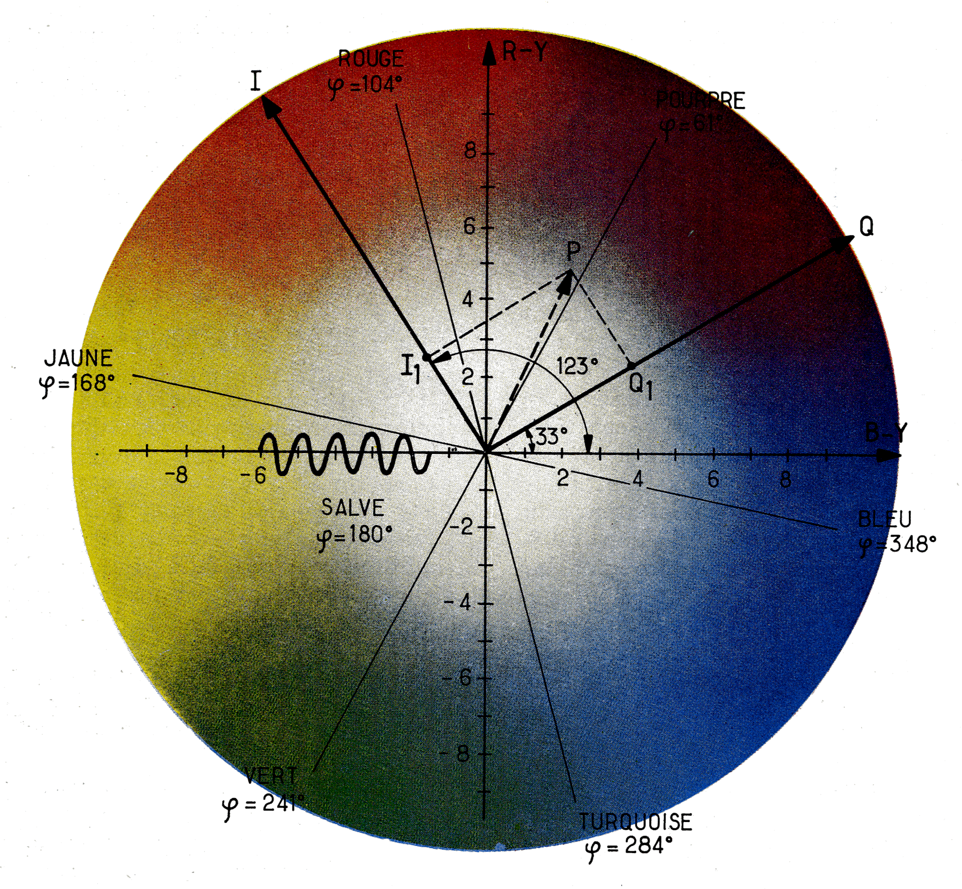
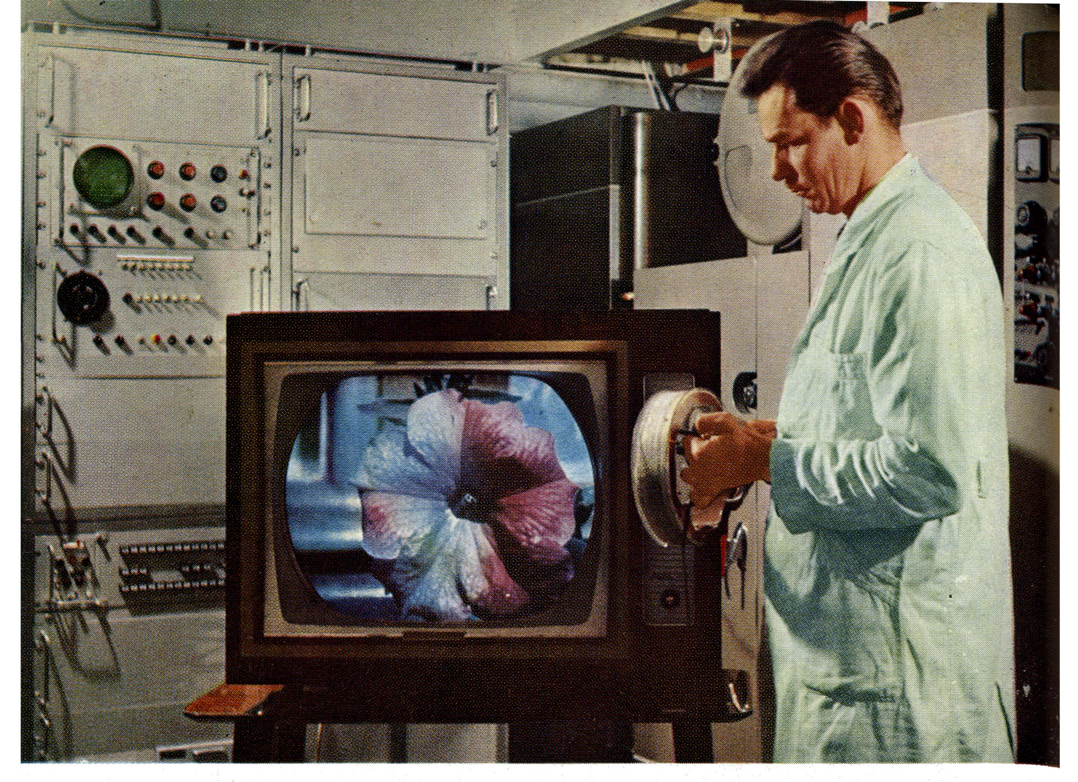


Fig. IX-1. — Plan de chrominance mettant en évidence : les axes de modulation I et Q du NTSC; la salve de synchronisation de phase; les lieux représentatifs des couleurs primaires et de leurs couleurs complémentaires; comment un point représentatif d'une couleur P peut être caractérisé par l'amplitude et la phase d'une sinusoïde.

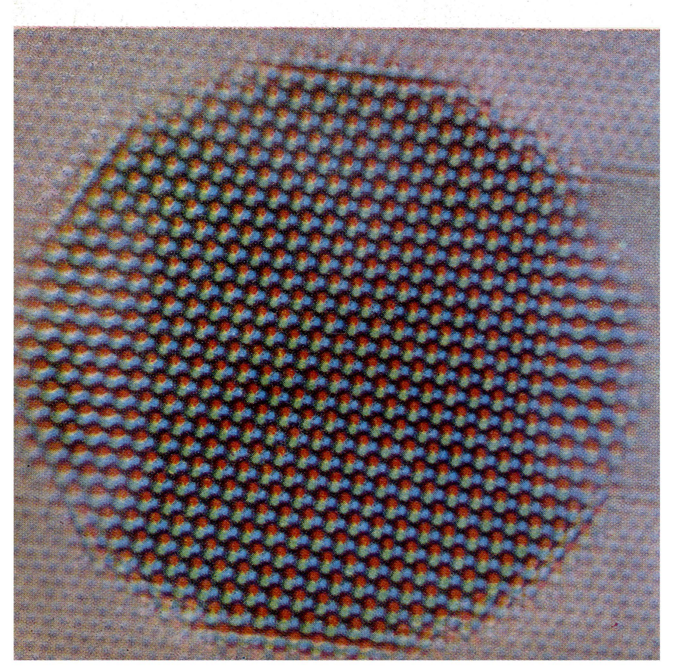
Dans la page ci-contre, installations de TV-couleurs à l'hippodrome de Longchamp. — En haut, une des caméras de prise de vues. — En bas, régie centrale où l'on observe simultanément les images en provenance de plusieurs caméras de manière à « envoyer sur l'antenne » la plus intéressante à tout instant donné.

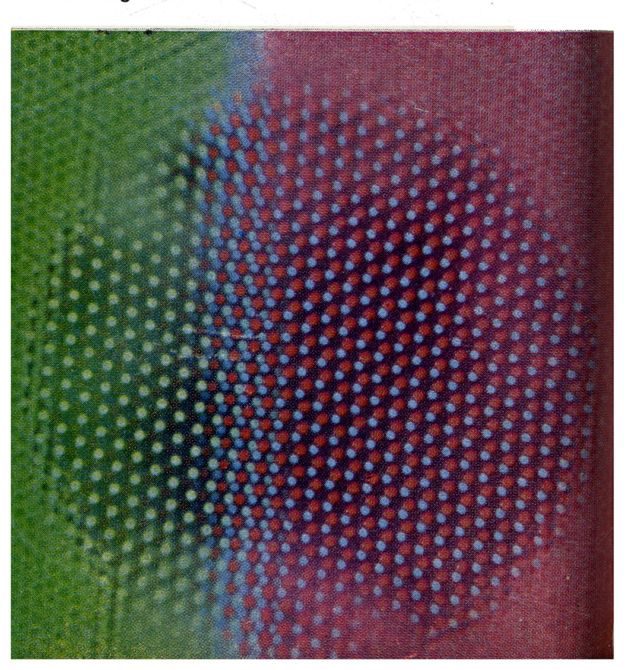
1
PHILIPS
9
1ere
COURSE

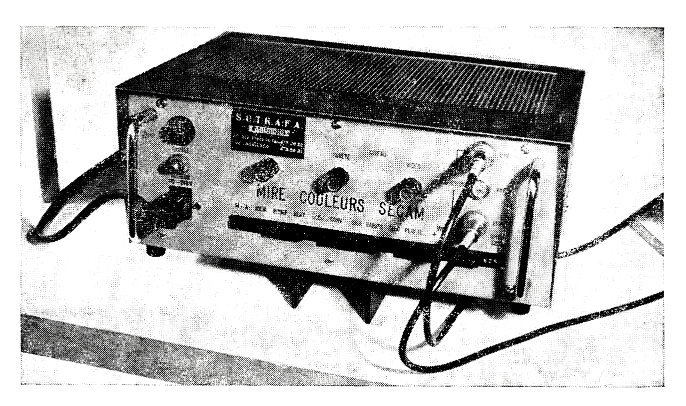


Ci-dessus, effet d'un champ magnétique perturbant les trajectoires des électrons dans un tube trichrome ce qui altère les teintes de l'image sur l'écran. Le démonstrateur, désolé de constater cet effet, s'apprête à démagnétiser le tube à l'aide de la bobine qu'il approche de celui-ci.

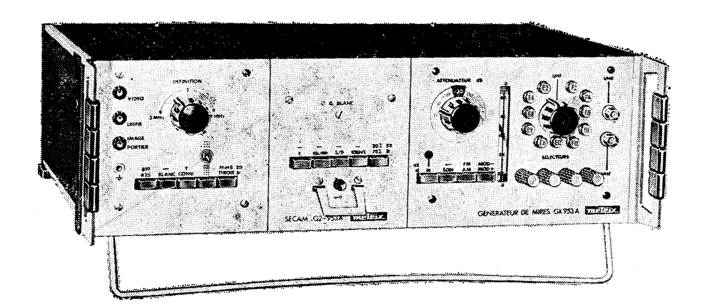
Ci-dessous, agrandissement d'une portion de l'écran d'un tube à masque. A gauche, on distingue les triades de luminophores R, B et V. A droite, on voit une transition de couleurs passant du vert au magenta.







Générateur de mires couleurs, type « CM 6 », permettant d'obtenir toutes les mires utiles pour le réglage d'un téléviseur couleurs : grille pour le réglage des convergences; image monochrome pour le réglage de la pureté; échelle de gris; mire de 8 barres verticales; pavé de traînage (SOTRAFA).



Mire universelle « GX 953 A », pour la vérification et le dépannage de tous les types de téléviseurs, en noir-blanc ou couleurs, en système SECAM, PAL ou N.T.S.C. Signaux délivrés : grille de convergence blanche sur fond noir; grille de géométrie noire sur fond blanc; grille de points; gris en dégradé; pavés noirs et blancs alternés; 8 barres verticales de couleurs normalisées (METRIX).



Mire couleurs, type « MTS-5 », délivre un quadrillage blanc, très fin sur fond noir, permet d'obtenir 4 teintes uniformes pour l'écran (blanc, vert, rouge et bleu) et donne un signal couleurs correspondant à 5 bandes horizontales : noir (en bas), bleu, rouge, vert et blanc (SIDER).

CHAPITRE VIII

L'épître de Curiosus a été rédigée en vue de préparer Ignotus à la conférence du Professeur Radiol. Pour assimiler plus aisément son contenu, il faut, en effet, connaître la signification des vecteurs et savoir les manier, ne serait-ce que pour additionner des phénomènes périodiques et représenter ainsi divers systèmes de modulation. La lettre traitera donc de :

Diagrammes de Fresnel. — Naissance d'une sinusoïde. — Addition de sinusoïdes. — Addition de vecteurs. — Méthode du parallélogramme. — Modulation d'amplitude. — Suppression de la porteuse. — Modulation par les signaux de chrominance.

CE QU'IL FAUT SAVOIR AU SUJET DES VECTEURS

CURIOSUS ÉCRIT A IGNOTUS

Mon cher Ignotus,

On m'apprend que vous voulez assister à la conférence de mon oncle, le Professeur Radiol, qui traitera de différents systèmes de télévision en couleurs. Excellente idée, cher ami. Vous savez certainement que c'est mon oncle qui m'a jadis inculqué les premiers principes de radioélectricité. Je lui en ai toujours su gré, car ses explications étaient d'une clarté lumineuse.

Le seront-elles pour vous? Le professeur Radiol s'adressera à un auditoire d'électroniciens possédant de solides connaissances théoriques. En exposant les principes du système NTSC — qui est à la base de tous les autres systèmes, — il fera assurément appel aux diagrammes de Fresnel, c'est-à-dire à la représentation vectorielle des phénomènes périodiques.

Etes-vous familiarisé avec les vecteurs et leur emploi dans l'étude des courants alternatifs? Si oui, ne perdez pas votre temps à lire la suite de cette lettre. Si non, elle vous sera utile en vous facilitant la compréhension de la conférence à laquelle vous allez assister.



Naissance d'une sinusoïde.

Partons du phénomène périodique le plus simple, celui que vous connaissez bien : le courant alternatif. Graphiquement, il est représenté par une sinusoïde. Pourquoi?

Parce que celle-ci indique quelles sont, à un instant donné, la valeur et la direction du courant. Mieux encore : on peut affirmer que le courant varie selon la loi sinusoïdale du fait qu'il est engendré dans des spires qui effectuent un mouvement de rotation dans un champ magnétique. Or, comme nous le verrons tout à l'heure, une sinusoïde peut être dessinée en faisant effectuer une rotation uniforme à un segment et en traçant sa projection.

Certes, on peut dessiner une sinusoïde en enregistrant le mouvement — périodique par excellence — du pendule. Il suffit de fixer à son extrémité inférieure un pinceau encré qui effleure un ruban de

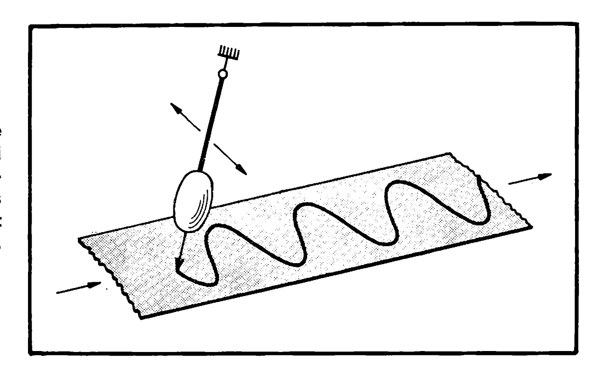
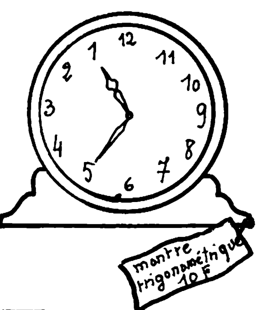


Fig. VIII-1. — Sur le ruban de papier qui défile à vitesse constante, les oscillations du pendule tracent une belle sinusoïde.

papier défilant d'un mouvement uniforme dans une direction perpendiculaire au plan des oscillations du pendule.

Mais si vous voulez dessiner une sinusoïde proprement, voici comment il faut procéder. Tracez un cercle et divisez sa circonférence en un certain nombre de parties égales, par exemple en 16. Imaginez alors qu'un rayon, orienté, pour commencer, horizontalement vers la droite (nous appellerons cela « position zéro »), se met à tourner dans le « sens trigonométrique », c'est-à-dire le sens contraire à celui des aiguilles d'une montre. Il passera successivement par les divers points que nous avons marqués sur la circonférence, en formant avec l'axe hori-



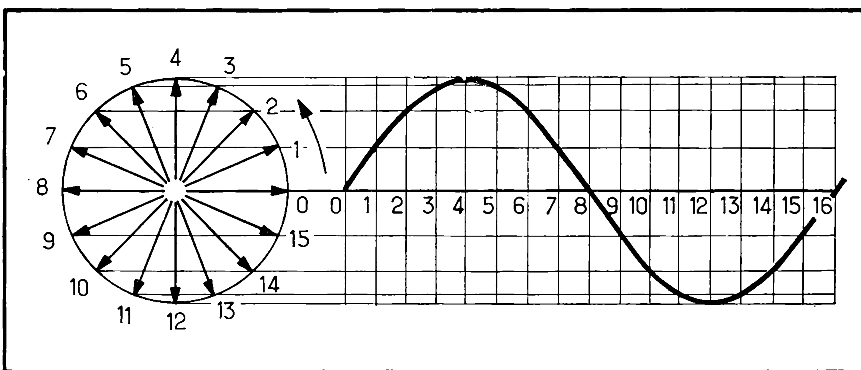


Fig. VIII-2. — Construction graphique d'une sinusoïde. Pour chaque position du rayon vecteur on obtient un point de la courbe.

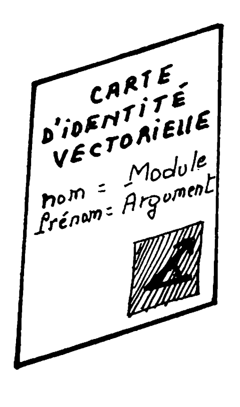
zontal des angles de 22,5°, de 45°, de 67,5°, de 90°, de 112,5° et ainsi de suite jusqu'à 360°.

Marquons maintenant, sur l'axe horizontal, 16 points équidistants. A la verticale de chacun de ces points plaçons la projection de l'extrémité du rayon qui tourne. Qu'est-ce à dire? Mais tout simplement que, de chaque point correspondant de la circonférence, nous faisons partir une droite horizontale qui coupe la verticale du point correspondant de l'axe. Le point n° 0 se trouve sur l'axe même. Le n° 1 est au-dessus, de même que les suivants jusqu'à 8 qui est à nouveau sur l'axe. Puis, les points sont situés au-dessous de l'axe. Le point le plus élevé est le n° 4 et le plus bas le n° 12.

Vous voyez, Ignotus, qu'une sinusoïde est formée par la rotation de ce rayon au même titre que le courant sinusoïdal est engendré par la rotation d'une spire dans un champ magnétique.

Voici ce qu'est un vecteur...

Notre rayon est caractérisé par sa longueur et sa direction. Sa longueur détermine l'amplitude de l'oscillation représentée par la sinusoïde; sa direction en détermine la phase. En effet, au lieu de prendre le départ du point marqué 0, notre rayon aurait pu démarrer à partir de n'importe quel autre point de la circonférence, ce qui aurait décalé notre sinusoïde en avant ou en arrière.



Ce rayon, qui a pour origine le centre du cercle, qui aboutit à un point de la circonférence et qui a une longueur déterminée, nous l'appellerons « vecteur ». Tout segment orienté peut d'ailleurs être ainsi désigné.

Un vecteur est entièrement défini quand on connaît sa longueur (que l'on appelle *module*), son point d'origine et sa direction définie par l'angle qu'il forme avec l'axe horizontal. Cet angle est appelé ***argument***.

Additionner des sinusoïdes ?...

Supposez maintenant, Ignotus, que nous ayons deux vecteurs ayant la même origine (on dit alors qu'ils sont « liés »), tournant avec la même vitesse, mais décalés l'un par rapport à l'autre. Ils donneront naissance à deux sinusoïdes elles aussi décalées — il vaut mieux dire « déphasées » — l'une par rapport à l'autre.

Procédons à l'addition de ces sinusoïdes pour déterminer quel est le résultat de la superposition, dans le même circuit, des oscillations représentées par ces sinusoïdes.

Prenons, pour commencer, le cas le plus simple, celui de deux vecteurs de longueur égale, mais opposés, c'est-à-dire décalés de 180°. Nous obtenons deux sinusoïdes d'amplitude et de période égales, mais déphasées de 180°. En tous points, les amplitudes instantanées sont égales et opposées. C'est dire que leur somme est partout nulle.

C'est ce qui se passe quand, à l'antenne de votre récepteur, parviennent à la fois l'onde directe d'un émetteur et l'onde réfléchie par la couche ionisée de la haute atmosphère. Si, en raison de la longueur plus grande du trajet, la seconde est en retard sur la première d'une

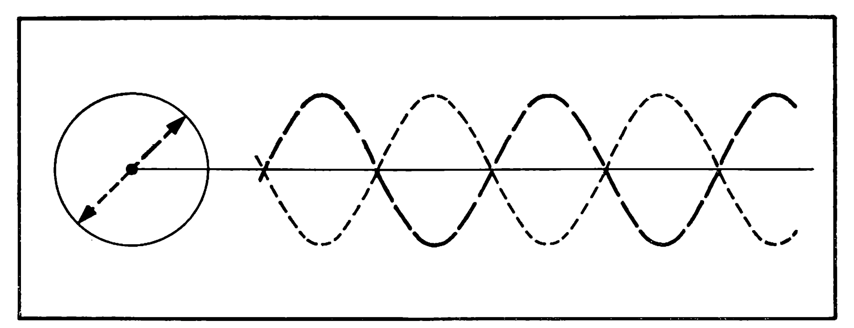
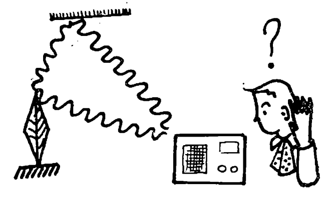


Fig. VIII-3. — Addition de deux oscillations sinusoïdales de même amplitude mais de phases opposées.

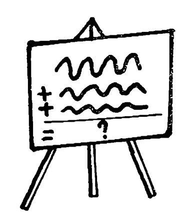
demi-période (déphasage de 180°) et que leurs amplitudes sont égales, le fading est total : les deux oscillations s'annulent, et vous n'entendez rien.



Si les amplitudes ne sont pas identiques, le fading sera partiel, et l'émission, bien qu'atténuée, sera audible.

Par chance, les deux ondes peuvent se trouver en phase. Alors les deux oscillations se renforcent. Vous additionnez aisément les deux sinusoïdes correspondantes.

Mais l'addition devient passablement complexe quand les deux sinusoïdes sont décalées et, de surcroît, ont des amplitudes différentes. Et tel est pourtant le cas le plus général. On est alors obligé de se livrer à un fastidieux travail d'addition (quand elles vont dans le même sens) ou de soustraction (quand leurs sens sont opposés) des amplitudes des divers points.



Mieux vaut additionner des vecteurs.

Voulez-vous que je vous livre le secret d'un procédé infiniment plus simple qui, tout en vous épargnant ces laborieuses additions, permettra de trouver les caractéristiques de l'oscillation résultante, c'est-

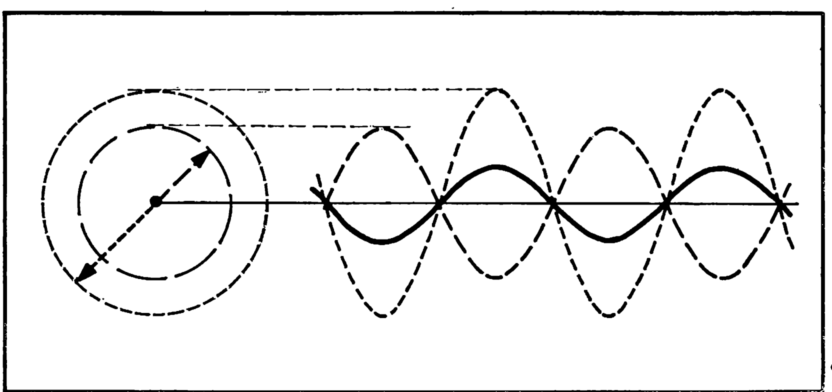
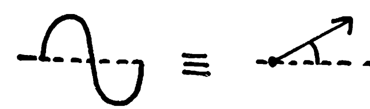


Fig. VIII-4. — Ici les deux oscillations sont toujours opposées en phase, et leurs amplitudes sont différentes. Elles sont représentées en traits interrompus; la somme est en trait continu.



à-dire sa phase et son amplitude? Eh bien, c'est l'*addition vectorielle.* Cela ne vous dit rien? Alors lisez ce qui suit.



Tout d'abord, sachez qu'à la place d'une sinusoïde, on est en droit de tracer simplement le vecteur qui a servi à l'engendrer. Sa longueur vous renseigne sur l'amplitude des oscillations et sa direction sur leur phase.

Vous pouvez, d'ailleurs, imaginer que le vecteur tourne dans une pièce obscure et que — un court instant à chaque tour — un éclair de lumière permet de l'apercevoir. Les éclairs se produisant à la même

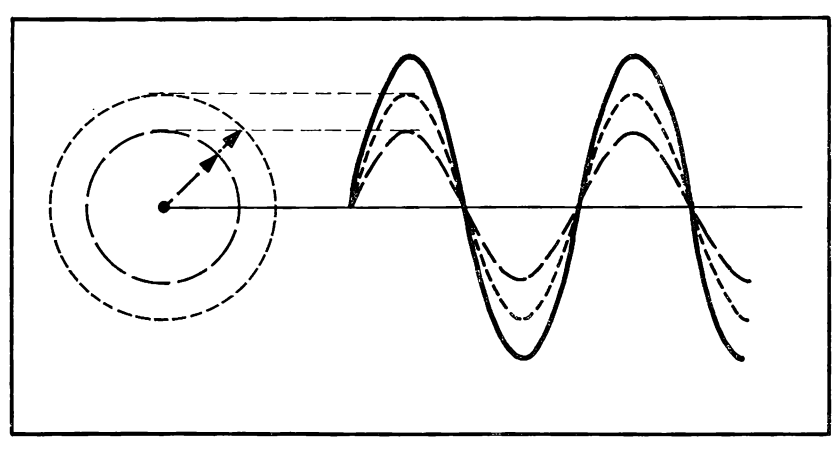


Fig. VIII-5. — Addition de deux oscillations en phase.

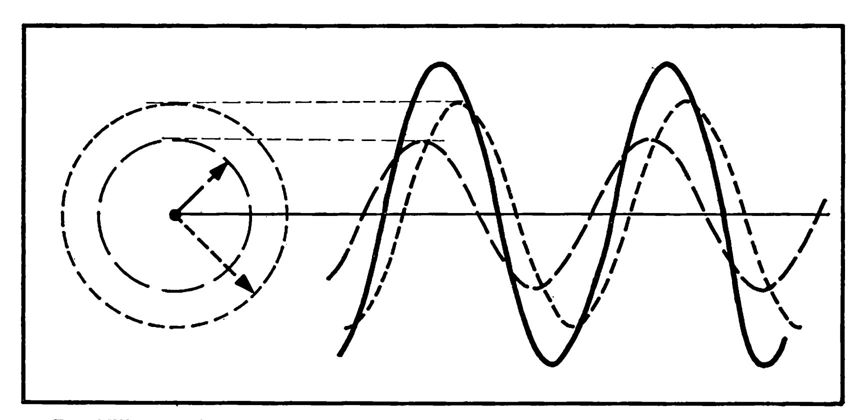


Fig. VIII-6. — Cas le plus compliqué : on additionne deux oscillations sinusoïdales déphasées d'un angle quelconque.



fréquence que celle de la rotation du vecteur, celui-ci nous paraîtra immobile, quelle que soit la vitesse de son mouvement. C'est le principe même de la stroboscopie.

Ayant ainsi remplacé les sinusoïdes par des vecteurs correspondants, vous noterez que ceux-ci demeurent immobiles les uns par rapport aux autres tant qu'il s'agit d'oscillations ayant des fréquences identiques.

Vous voulez additionner deux sinusoïdes? Eh bien, faites la somme de leurs vecteurs. Comment? Tout simplement en plaçant le deuxième vecteur au bout du premier; leur somme sera représentée par un troisième vecteur ayant pour origine celle du premier et pour extrémité celle du second.

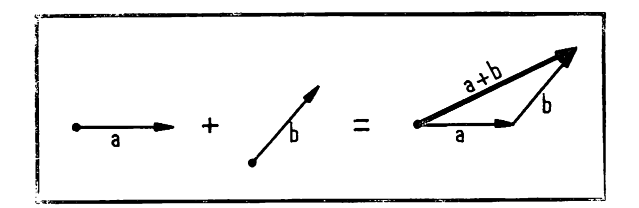


Fig. VIII-7. — Pour additionner deux vecteurs, on place l'un à l'extrémité de l'autre.

Vérifiez ce que je viens de vous dire sur les exemples d'addition des sinusoïdes que nous avons examinés. Deux vecteurs opposés de longueurs identiques s'annulent. Si leurs longueurs sont différentes, la somme a pour longueur la différence de leurs longueurs et est orientée dans la direction du plus long des deux. Et quand la différence des phases est autre que 180°, l'addition vectorielle permet de déterminer l'amplitude et la phase de l'oscillation résultante.

J'ajoute que, au lieu de placer les vecteurs l'un au bout de l'autre, on peut aussi construire un parallélogramme. (Ne l'avez-vous pas appris en mécanique?) On place les deux vecteurs en confondant leurs origines. On fait partir de l'extrémité de chacun une droite parallèle à l'autre. Et, dans le parallélogramme ainsi obtenu, la diagonale partant de l'origine commune est justement le vecteur somme.

Vous voyez combien cette représentation vectorielle, imaginée par le physicien français FRESNEL, simplifie les raisonnements et l'étude du comportement des circuits en courant alternatif. Sachant que les self-inductions entraînent un déphasage en retard de 90° et que les capacités, au contraire, font avancer le courant de 90° sur la tension, on peut aisément tracer le diagramme de FRESNEL pour un circuit composé de bobinages, de condensateurs et de résistances ohmiques (qui, elles, ne déphasent pas le courant par rapport à la tension).

Modulation d'amplitude.

Où les choses se compliquent, c'est quand les diverses oscillations mises en jeu n'ont pas la même fréquence. C'est, par exemple, le cas d'une oscillation H.F. modulée en amplitude par une oscillation B.F.

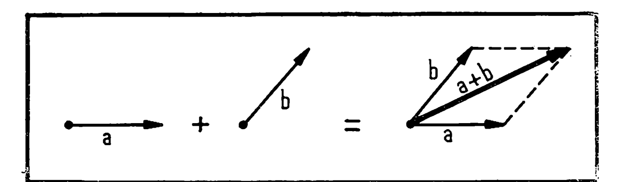


Fig. VIII-8. — Addition par la méthode classique du parallélogramme.

On sait qu'en ce cas il se forme deux fréquences latérales de modulation, l'inférieure I et la supérieure S. Les vecteurs correspondants tourneront par rapport au vecteur P. La fréquence de S étant supérieure à

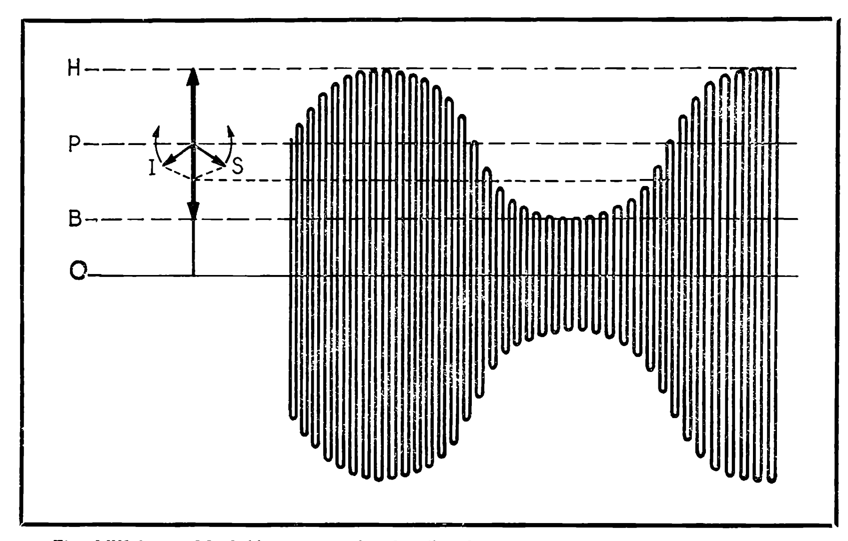
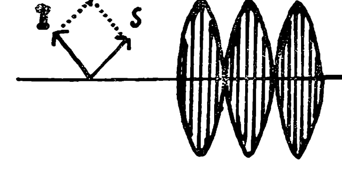


Fig. VIII-9. — Modulée en amplitude, l'onde porteuse P fait apparaître deux bandes latérales représentées par des vecteurs symétriques I et S tournant dans des sens opposés. L'addition des trois vecteurs donne un vecteur dont la longueur varie entre OB et OH.

celle de P, il tournera donc plus vite que celui-ci. Et, dans l'éclairage stroboscopique où P semble immobile, S tournera dans le sens contraire à celui des aiguilles d'une montre. En revanche I, de fréquence inférieure à P, tournera dans l'autre sens. La somme des trois vecteurs sera toujours dirigée dans le sens de P, car I et S sont toujours disposés symétriquement par rapport à P. Donc il n'y a pas de variation de phase. En revanche, l'amplitude change atteignant le maximum pour P + 2 S et le minimum pour P — 2 S.



En fait, on a la possibilité de ne transmettre que les deux bandes latérales en supprimant la porteuse elle-même. Certes, pour démoduler le signal à la réception, il faut, dans ce cas, regénérer la porteuse dans le récepteur qui, à cette fin, contient un oscillateur local accordé sur la fréquence de la porteuse.

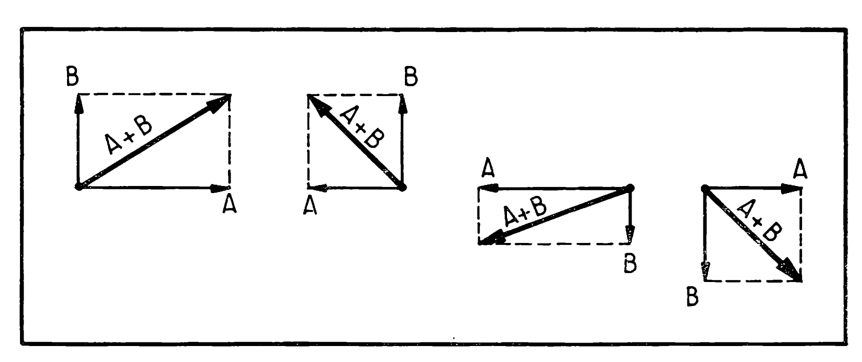


Fig. VIII-10. — Selon la polarité des vecteurs A et B leur somme peut occuper diverses positions.

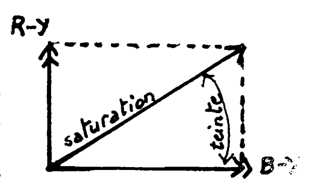
Comment parvient-on à supprimer la porteuse? On pourrait le faire en la mettant en opposition avec une autre oscillation de même amplitude. Mais on préfère employer à cet effet un modulateur équilibré qui ne laisse apparaître à la sortie que le produit de ce qui l'avait déséquilibré, c'est-à-dire les bandes latérales de modulation.

L'astuce du NTSC

Imaginez maintenant, mon cher ami, quelque chose qui va vous paraître très complexe (pour ne pas dire vicieux). Supposez que vous ayez deux oscillations sinusoïdales dont chacune est modulée en amplitude par un signal variable. Après tout ce que nous avons étudié avec vous, je ne saurais cacher qu'il s'agit, en l'occurrence, des deux signaux de chrominance, le rouge et le bleu ou, pour être plus près de la vérité, des signaux différentiels (R — Y) et (B — Y).

Que faire de nos deux sinusoïdes ainsi modulées pour les transmettre alors que — ne l'oubliez pas! — pour l'acheminement de la chrominance, nous ne disposons que d'une sous-porteuse?

L'astuce employée dans le système américain N.T.S.C. consiste à déphaser ces deux sinusoïdes de 90° avant de les additionner. Quel sera le résultat?



Grâce aux vecteurs, nous pouvons aisément répondre à la question. L'une de nos oscillations pourra être représentée par un vecteur horizontal; l'autre sera, par conséquent, représentée par un vecteur vertical, puisque le déphasage est de 90°.

Ces vecteurs pourront avoir des valeurs positives ou négatives, car les différences (R — Y) et (B — Y) dépendent des teintes des points analysés. Le vecteur horizontal pourra donc être orienté aussi bien vers la droite que vers la gauche. De même, le vertical pourra pointer aussi bien vers le haut que vers le bas.

La valeur instantanée de chaque vecteur dépend de la saturation de la teinte correspondante.

Et que faisons-nous de nos deux sinusoïdes ainsi modulées et déphasées de 90°? Mais nous les additionnons tout bonnement. Et le résultat, ce sera un vecteur qui, à tout instant, par sa direction (en langue savante : son argument) représentera la *teinte* de l'élément analysé de l'image, alors que sa longueur (ou mieux : son module) traduira la *saturation* dudit élément.

N'est-ce pas au plus haut point ingénieux?... Mais je constate que, pris par le sujet, j'ai quelque peu défloré ce que vous entendrez de la bouche de mon éminent oncle de professeur.

Bien cordiales amitiés de votre

CURIOSUS

CHAPITRE IX

Les chapitres qui précèdent celui-ci ont préparé le lecteur à la compréhension de la conférence au cours de laquelle sont exposés les principes et examinés les avantages et les défauts des trois principaux systèmes compatibles : le NTSC, le PAL et le SECAM. Le Professeur Radiol passe en revue les sujets suivants :

Modulation en quadrature du NTSC. — Choix de la fréquence sous-porteuse. — Décodage. — Gain différentiel. — Phase différentielle. — Enregistrement magnétique. — Diaphotie. — Principe du PAL. — Décodage dans le PAL standard et le PAL simple. — Performances du PAL. — Principe du SECAM. — Codage et décodage. — Performances du SECAM.

LES DIFFÉRENTS SYSTÈMES COMPATIBLES

(Texte intégral de la conférence prononcée par le Professeur RADIOL de l'**Ecole Supérieure des Techniciens de la Télévision** dans la salle de conférences du **Centre National de Télédiffusion à VIDEO)**

Monsieur le Directeur Général,
Messieurs les Ingénieurs Généraux,
Chers anciens élèves,
Messieurs,

La télévision en couleurs, dont on parle tant en ce moment, repose sur des principes généraux qui ont été dictés par un certain nombre d'impératifs techniques et économiques. Ainsi, bien qu'il existe plusieurs procédés possibles qui présentent des propriétés différentes et que nous allons analyser au cours du présent exposé, nous trouverons pour tous une base commune préconisée par l'ingénieur français Georges VALENSI : en particulier, tous les procédés compatibles utilisent la transmission à large bande d'un signal de *luminance* auquel on ajoute une *sous-porteuse* à haute fréquence modulée par les signaux de *chrominance,* ces derniers étant ce qu'on appelle des *différences de couleurs,* c'est-à-dire des signaux qui s'annulent lorsqu'il n'y a pas de couleurs à transmettre.

Toute la différence entre les systèmes compatibles réside dans le type de modulation de la sous-porteuse par les signaux de chrominance.

Pour chaque système, nous analyserons la structure du *codeur* (ce qui nous conduira à étudier les normes de transmission), la structure du *décodeur* (c'est-à-dire les particularités du récepteur) et les propriétés caractéristiques examinées du point de vue de la qualité de la transmission.

Nous nous bornerons aux trois systèmes employés à l'heure actuelle qui sont, par ordre chronologique d'invention : le NTSC (*National Television System Committee*) dû à une équipe d'ingénieurs américains, essentiellement des firmes *Hazeltine* et *RCA* et utilisé aux Etats-Unis, au Japon et au Canada; le SECAM (*SEquence de Couleurs Avec Mémoire*) développé par la *Compagnie Française de Télévision* d'après une idée originale de Henri de FRANCE (1956) et adopté par un grand nombre de pays; et enfin le PAL (*Phase Alternation Line*), variante du NTSC mise au point en Allemagne dans les laboratoires *Telefunken* de Hano-

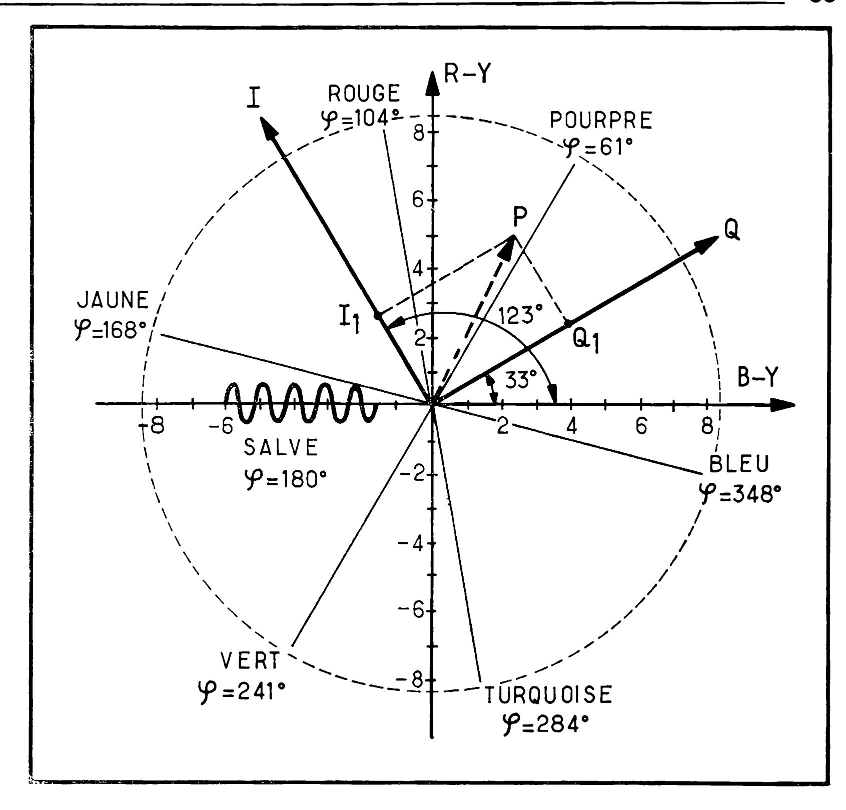


Fig. IX-1. — Plan de chrominance mettant en évidence : les axes de modulation I et Q du NTSC; la salve de synchronisation de phase; les points représentatifs des couleurs primaires et de leurs couleurs complémentaires; comment un point représentatif d'une couleur P peut être caractérisé par l'amplitude et la phase d'une sinusoïde.

(Voir cette figure en couleurs page 70.)

vre sous la direction de Walter Bruch et également adopté par de nombreux pays. Bien que ce dernier système ait vu le jour récemment (1963), nous l'analyserons immédiatement après le NTSC dont il est très voisin.

Les systèmes FAM (*Frequenz-Amplitude-Modulation*) de Norbert Mayer (IRT, Munich), DST (*Dot Sequential Transmission*) de Ptaček (VURT, Prague), NIR (ou SECAM IV) élaboré au *Telezentr* de Moscou d'après une idée du Professeur Chmakof, qui n'ont pas conduit à des réalisations pratiques, ne seront pas étudiés au cours de cet exposé, ce qui ne présume en rien de leurs qualités, une expérimentation insuffisante n'ayant pas permis de se faire une opinion quant à leurs performances.

I. — SYSTEME NTSC

1) Codage.

Le principe de la transmission des couleurs en NTSC apparaît clairement sur le plan de chrominance que l'on peut assimiler à un diagramme de Fresnel. C'est-à-dire qu'un vecteur quelconque, issu de l'origine, est l'image d'une sinusoïde dont l'amplitude est proportionnelle au *module* (ou longueur) et la phase égale à *l'argument* (ou angle algébrique formé par le vecteur et l'axe horizontal) du vecteur.

On peut donc dire — très grossièrement — qu'en NTSC, la phase de la sous-porteuse exprime la *teinte* de la couleur à transmettre et, pour une teinte donnée, l'amplitude représente la *saturation* (1). En

(1) Voir les théorèmes III et IV du chapitre IV (colorimétrie).

particulier, la sous-porteuse disparaît sur une plage achrome (blanc, gris ou noir).

La méthode électronique mise en œuvre pour réaliser cette double modulation se dégage elle aussi de l'examen du plan de chrominance.

Une onde sinusoïdale, dont nous définirons la fréquence dans un instant, est modulée en amplitude avec suppression de porteuse par le signal (B — Y). Son image dans le diagramme de FRESNEL est donc l'axe horizontal du plan de chrominance. Une autre onde sinusoïdale de même fréquence, mais déphasée de + 90° par rapport à la précédente, est modulée en amplitude avec suppression de porteuse par le signal (R — Y). Son image est l'axe vertical du plan de chrominance. La superposition de ces deux ondes modulées donne la sous-porteuse cherchée. Grâce à la suppression de l'onde porteuse, une image monochrome, qui se caractérise par (R — Y) = (B — Y) = 0 ne comprend jamais de sous-porteuse; si l'on avait pratiqué une modulation d'amplitude ordinaire, ce n'aurait pas été le cas; la suppression de la porteuse assure donc une reproduction obligatoirement sans dominante de l'échelle des gris et une réduction de la visibilité de la sous-porteuse dans les images compatibles monochromes.

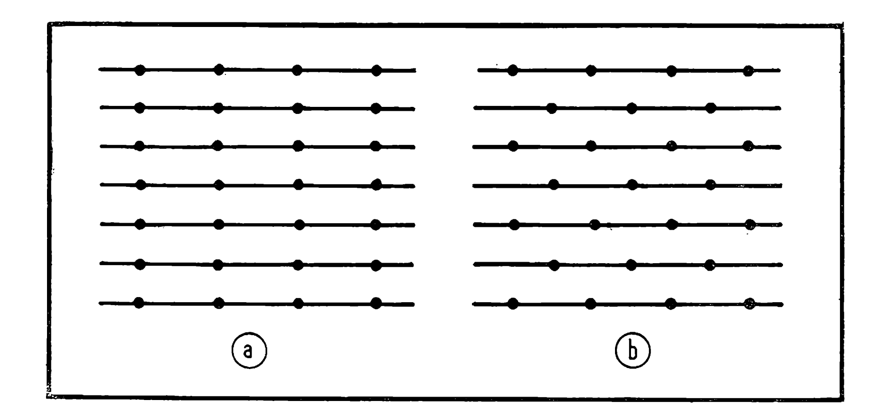


Fig. IX-2. — (a) Points alignés provenant d'une sous-porteuse dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence de balayage lignes; b) points « entrelacés » d'une sous-porteuse dont la fréquence est un multiple impair de la demi-fréquence lignes.

Ce type de modulation porte le nom de *modulation en quadrature* et on comprend bien pourquoi.

En fait, le codeur NTSC n'utilise pas directement les signaux (R — Y) et (B — Y), mais deux combinaisons linéaires :

$$I = 0{,}877(R - Y).\cos 33° - 0{,}493(B - Y).\cos 57°$$

$$Q = 0{,}877(R - Y).\cos 57° + 0{,}493(B - Y).\cos 33°$$

dont les images sont deux axes perpendiculaires (I = *In phase;* Q = *Quadrature*) qui se déduisent des précédents par une rotation de + 33° et un changement d'échelle. Les transitions selon l'axe I, en effet, (de l'orange au turquoise), sont celles pour lesquelles l'œil présente la meilleure acuité. Nous allons voir dans un instant le parti que tire le système NTSC des variations du pouvoir de résolution de l'œil en fonction de la teinte. Mais, auparavant, nous avons à définir la fréquence de la sous-porteuse.

Il est évident qu'elle doit se situer dans la partie supérieure du spectre vidéo là où l'énergie des composantes de luminance est statistiquement faible, afin de minimiser l'interaction entre les informations de luminance et de chrominance, qui doivent rester indépendantes. Dans l'image que donne un récepteur noir et blanc d'un programme émis en couleurs va donc apparaître un *pointillé* d'autant plus marqué que la saturation des couleurs transmises sera élevée (puisqu'elle se manifeste par une plus grande amplitude de la sous-porteuse). Si la fréquence de la sous-porteuse est quelconque, des alignements de points éternellement en mouvement vont créer des *moirages* très gênants.

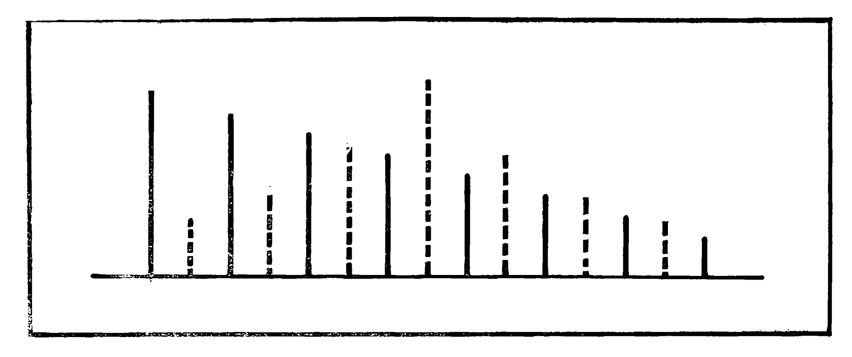


Fig. IX-3. — Raies spectrales du signal de luminance « entrelacées » avec les raies spectrales de la sous-porteuse.

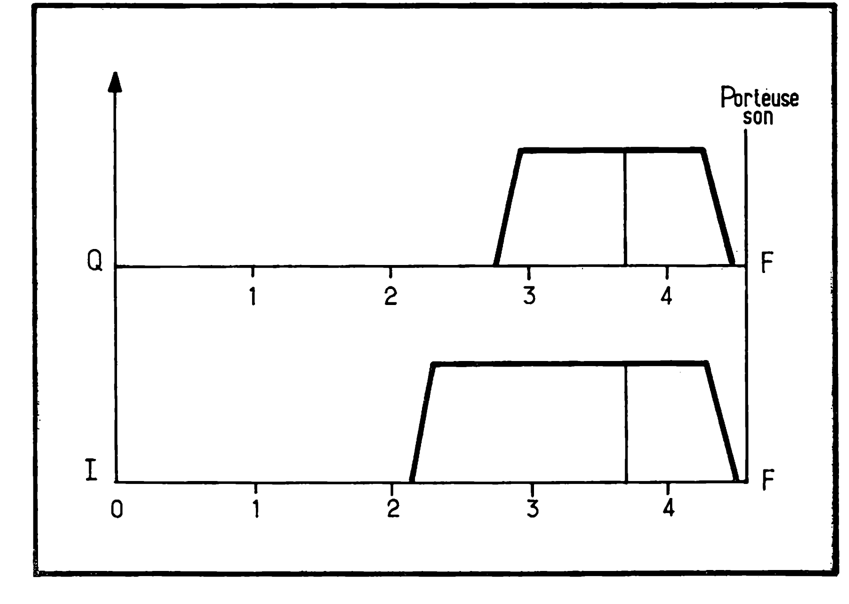
La première condition est donc d'obtenir un dessin fixe, c'est-à-dire que le rapport de la fréquence de la sous-porteuse à la fréquence de balayage lignes soit un nombre rationnel (que l'on peut présenter sous forme d'une fraction de deux nombres entiers). Si c'est un nombre entier, les points seront alignés verticalement, ce qui conduit à un dessin également très apparent en forme de grille. La meilleure solution consiste à aligner les points à 45° ou, si l'on préfère, à les intercaler d'une ligne à la suivante. Ce résultat, qui s'inspire de la disposition des trames en imprimerie et, en TV, du calage des fréquences d'émission sur des canaux voisins, conduit à choisir une sous-porteuse dont la fréquence F_{sp} soit égale à un multiple impair de la moitié de la fréquence de balayage horizontal F_h :

$$F_{sp} = (2n + 1)\frac{F_h}{2}$$

(où n est un nombre entier).

Avec les normes américaines à 525 lignes et 30 images par seconde, on a $F_h = 15\,750$. Si nous adoptons $n = 227$, nous trouvons pour la fréquence de la sous-porteuse F_{sp} 3,58 MHz, valeur adoptée pour le NTSC. Elle présente un autre avantage.

Comme on sait, le spectre de fréquences d'une image de télévision n'est pas uniforme : l'énergie est concentrée le long de raies disposées à F_h, $2F_h$, $3F_h$ etc., F_h désignant toujours la fréquence lignes. La sous-porteuse vient donc se placer exacte-



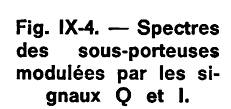


Fig. IX-4. — Spectres des sous-porteuses modulées par les signaux Q et I.

ment entre deux telles raies (la 227e et la 228e), et ses propres raies latérales sont intercalées dans celles du signal de luminance. Cela procure une bonne indépendance des deux informations lors de la transmission. En effet, une composante de luminance dont la fréquence se trouve voisine de la sous-porteuse pourrait être démodulée par le décodeur comme s'il s'agissait d'une composante de chrominance. Ce phénomène porte dans la littérature le nom de « cross-color »; et l'*entrelacé* des spectres de luminance et de chrominance au sein du signal complexe réduit cet effet.

Revenons maintenant aux deux sinusoïdes modulées en amplitude avec suppression de porteuse par les signaux I et Q. Avant superposition pour former la sous-porteuse unique, les spectres de ces deux sinusoïdes modulées sont soigneusement filtrés. Vers les hautes fréquences, il faut que les bandes latérales supérieures soient suffisamment atténuées au voisinage de la porteuse son (qui n'est qu'à 4,5 MHz de la porteuse principale en standard américain).

générale des circuits, le signal Q, transmis avec une bande passante plus faible (donc par un circuit moins amorti), prend un retard plus grand que le signal I. Pour les remettre convenablement en phase, il suffit, avant superposition, de retarder le signal I (à l'aide d'une ligne à retard) de la différence des temps de propagation.

Nous verrons, en étudiant les performances du système NTSC, qu'une telle dissymétrie dans les bandes latérales entraîne généralement une distorsion connue sous le nom de *défaut de quadrature* et se caractérisant par une *diaphotie* entre les signaux de chrominance; ce qui, en télévision, correspond à une diaphonie en B.F.; dans ce cas très précis de dissymétrie par principe, le défaut est éliminé dans le récepteur; et nous verrons comment.

Les deux sinusoïdes sont à présent superposées et forment la sous-porteuse. On doit lui adjoindre un signal de reconnaissance de l'origine des phases. En effet, nous avons précisé que la modulation d'amplitude se faisait avec *suppression* de por-

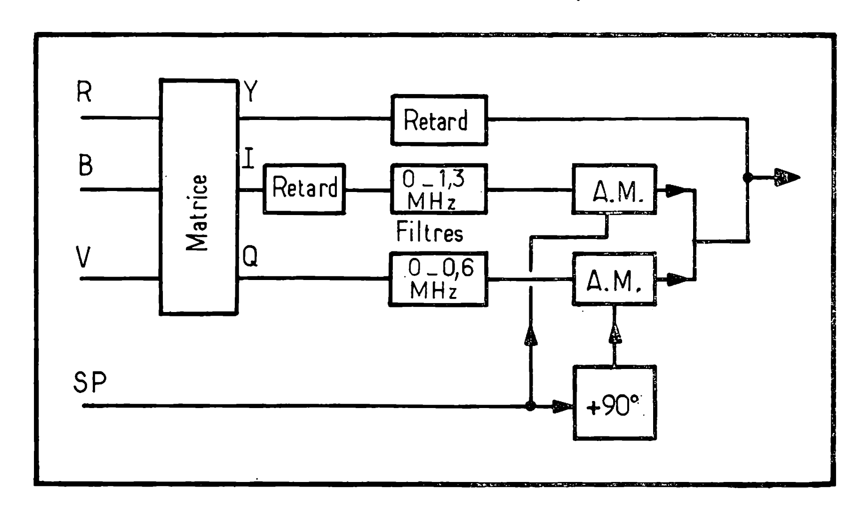


Fig. IX-5. — Schéma synoptique simplifié d'un codeur NTSC.

On ne conserve donc qu'une bande latérale de 0,6 MHz à — 6 dB.

Le signal I, dont on a dit qu'il devait transmettre des détails plus fins que le signal Q, doit avoir un spectre plus grand. Et, alors que le signal Q est transmis avec deux bandes latérales égales de 0,6 MHz, le signal I possède une bande latérale inférieure large de 1,3 MHz (toujours mesurée à — 6 dB). Conformément à la théorie

teuse. Le récepteur doit donc *régénérer* la porteuse pour pouvoir démoduler les bandes latérales transmises; et, comme la modulation d'amplitude est compliquée d'une modulation de phase, il est nécessaire de fournir au récepteur une information sur l'origine des phases. On a choisi de transmettre, sur le palier de référence du noir lignes (entre l'impulsion de synchronisation et le début de la ligne), une *salve*

de huit périodes de sous-porteuse donnant la référence de phase de — (B — Y). Dans la littérature anglo-saxonne, ce signal d'identification de la phase s'appelle « *burst* » (éclatement).

monté en discriminateur de phase; le signal d'erreur est convenablement filtré et amplifié et sert à piloter un étage à réactance en contre-réaction, de façon à asservir la phase de l'oscillateur à celle des salves.

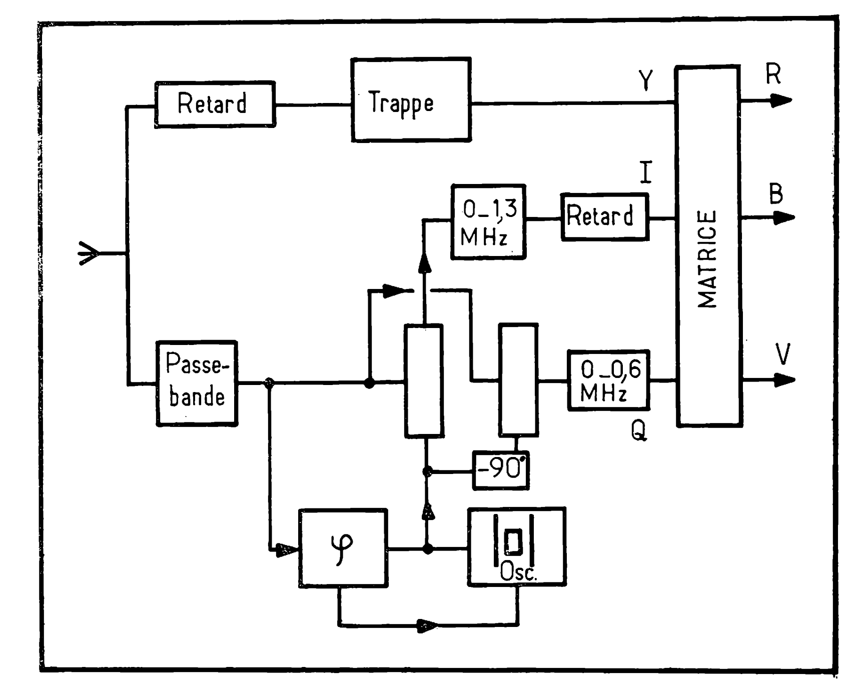


Fig. IX-6. — Schéma synoptique simplifié d'un décodeur NTSC.

Avant de superposer la sous-porteuse modulée au signal de luminance pour former le signal complexe, on aura soin à nouveau d'égaliser les temps de propagation. Il suffit de faire subir au signal Y un retard artificiel (par ligne à retard) égal à la différence des temps de propagation de Q et de Y. Ainsi, à la sortie du codeur, les trois informations sont parfaitement synchrones.

2) Décodage.

A la réception, un filtre passe-bande isole la sous-porteuse du signal de luminance. Les salves d'identification de la phase de la sous-porteuse sont prélevées et vont servir à synchroniser la porteuse reconstituée, nécessaire à la démodulation.

Pour cela, on utilise un *oscillateur à quartz* dont la phase est comparée à celle des salves par un modulateur en anneau

La porteuse ainsi reconstituée doit être disponible avec deux phases différant de 90° (par exemple, au primaire et au secondaire d'un transformateur); et la démodulation synchrone de la sous-porteuse par ces deux ondes restitue I et Q. Des filtres passe-bas, respectivement de 1,3 et 0,6 MHz de bande passante, ne laissent passer de I et de Q que la partie utile, et on égalise les temps de propagation de ces deux signaux par une ligne à retard dans le canal I. Une matrice (1) effectue le calcul suivant qui permet de retrouver les trois composantes originales de chrominance :

$$R - Y = 0{,}96\ I + 0{,}62\ Q$$
$$B - Y = -1{,}1\ I + 1{,}7\ Q$$
$$V - Y = -0{,}28\ I - 0{,}64\ Q$$

(1) Ce terme, rappelons-le, désigne un ensemble de circuits servant à mélanger linéairement plusieurs signaux électriques, autrement dit à en effectuer l'addition ou la soustraction

De son côté le signal Y est débarrassé de la sous-porteuse par un filtre coupe-bande, et une ligne à retard l'amène en synchronisme avec les signaux I et Q. Il suffit alors d'effectuer, dans des matrices à résistances, les opérations :

$$R = (R - Y) + Y$$
$$B = (B - Y) + Y$$
$$V = (V - Y) + Y$$

pour retrouver les trois signaux primaires.

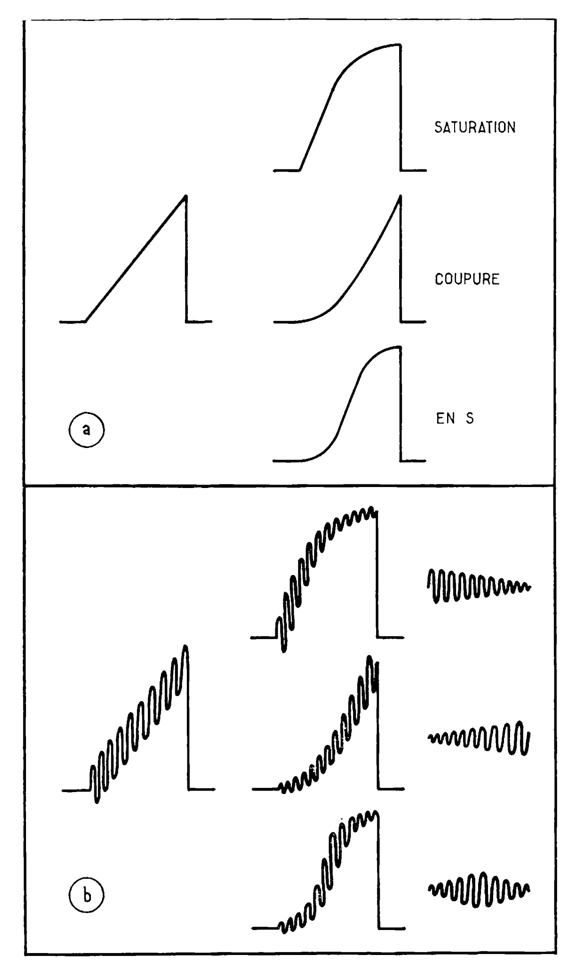


Fig. IX-7. — (a) Par suite d'un manque de linéarité d'un amplificateur de puissance, un signal en dent de scie peut être affecté de diverses distorsions : saturation, coupure, « en S »; (b) le même signal modulé par une tension sinusoïdale et subissant les mêmes distorsions. Il en résulte que l'amplitude des oscillations de la sinusoïde sera modifiée.

3) Performances.

Le système NTSC est un monument d'ingéniosité qui a été salué comme tel par les techniciens du monde entier quand les premières descriptions en ont été publiées en 1953. Malheureusement, en raison d'une hâte qui ne semble justifiée que par la pression externe du marché, ce système n'a pas eu le temps de mûrir en laboratoire ni de subir les essais fondamentaux, avant l'adoption définitive de ses normes.

C'est ainsi que les équipements de transmission et d'émission, les enregistreurs magnétiques et les matériels vidéo, de même que les récepteurs présentent dans la partie supérieure du spectre un certain nombre de distorsions de phase comme d'amplitude qui, sans doute négligeables pour un service monochrome, ont une influence néfaste sur la transmission des couleurs selon le système NTSC. Analysons très rapidement ces distorsions :

a) *Gain différentiel.*

Il est inévitable qu'un amplificateur de puissance présente des non-linéarités. Elles peuvent être de trois natures différentes : distorsion par saturation, distorsion par coupure, distorsion en S; ainsi un signal en dent de scie parfaitement linéaire, appliqué à un tel amplificateur, en sortira distordu.

Ce genre de distorsion est assez peu gênant en noir et blanc où il crée une certaine erreur de gradation, sans plus. En télévision en couleurs selon le système NTSC, il va de soi que l'amplitude de la sous-porteuse variera intempestivement. Ainsi, imaginons qu'une sinusoïde d'amplitube faible mais constante ait été superposée au signal en dent de scie précédent; à la sortie de l'amplificateur, l'amplitude de cette sous-porteuse ne sera pas constante, mais dépendra du niveau instantané du signal de luminance.

Ce phénomène, qui fait que le *gain* de l'amplificateur sur la sous-porteuse *est fonction de la valeur instantanée de la luminance,* est connu sous le nom de *gain différentiel;* comme on se souvient que l'amplitude de la sous-porteuse transmet l'information de saturation des couleurs, on voit que les non-linéarités inévitables entraînent des *distorsions de saturation.*

b) *Phase différentielle.*

Les réactances d'entrée et de sortie des éléments actifs (tubes ou transistors) varient, comme on sait, légèrement avec le point de fonctionnement sur la caractéristique dynamique. Il s'ensuit un déphasage parasite, fonction de la position de ce point.

c) *Enregistrement magnétique.*

Lors de la reproduction d'un programme enregistré sur bande magnétique, la précision relative de la phase φ de la sous-porteuse lue par la machine est égale à la précision relative de vitesse v de déroulement de la bande :

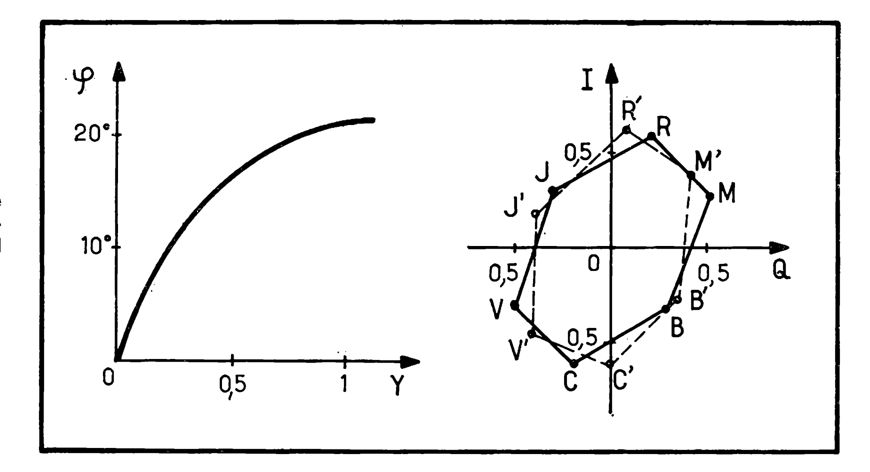


Fig. IX-8. — Effet de la phase différentielle sur un signal NTSC.

Alors que l'effet sur le signal de luminance est négligeable, ce déphasage parasite fait tourner les points figuratifs des couleurs dans le plan de chrominance d'angles différents selon la valeur correspondante du signal de luminance et, par conséquent, la reproduction de la teinte est faussée.

Ce phénomène prend naissance dans tous les éléments actifs, mais il peut se compliquer d'un autre. Dans les équipements qui utilisent la FM comme mode de transmission des signaux vidéo (faisceaux hertziens, satellites, magnétoscopes), la porteuse modulée est filtrée par des circuits passe-bande qui présentent une caractéristique phase-fréquence qui ne saurait être linéaire (puisqu'il y a des fréquences frontières). Par conséquent, il apparaît, après démodulation, un déphasage non constant, fonction de la fréquence instantanée de la porteuse, c'est-à-dire du signal de luminance.

En résumé, on peut dire qu'avec le système NTSC, à toute distorsion non-linéaire correspond une erreur de teinte (phase) ou de saturation (amplitude), voire des deux. L'expérience a montré qu'un défaut de phase de ± 5° est déjà perceptible en NTSC.

$$\frac{\Delta \varphi}{\varphi} = \frac{\Delta v}{v}$$

où $\Delta\varphi$ et Δv sont des variations de phase et de vitesse. Si l'on synchronise la machine à la fin de chaque ligne, en admettant que l'erreur de vitesse reste constante, la phase de la sous-porteuse sera entachée en fin de ligne (juste avant la remise en synchronisme) d'une erreur :

$$\Delta\varphi = \varphi_{max} \times \frac{\Delta v}{v}$$

avec $\varphi_{max} = 227{,}5 \times 360° = 163\,800°$

Pour une erreur relative normale

$$\frac{\Delta v}{v} = 0{,}3\ \%$$

$$\Delta\varphi = 491°\ 24'$$

c'est-à-dire que le long d'une ligne, le plan de chrominance a effectué une rotation de un tour et un tiers (!) et que la teinte est faussée de façon continue de gauche à droite.

Les enregistreurs de studio travaillent généralement avec quatre têtes rotatives, chacune servant à l'enregistrement ou à la lecture d'une vingtaine de lignes. Il va de soi que les *transmittances* complexes de ces

quatre têtes — c'est-à-dire leurs comportements en amplitude et en phase — ne sauraient être identiques. La commutation d'une tête à la suivante cause donc un brutal changement de phase et d'amplitude que le quartz du récepteur ne saurait compenser, sa surtension étant trop grande. Sur l'image en couleurs, on verra, par conséquent, apparaître des bandes horizontales de teintes et de saturations différentes.

Un troisième phénomène intervient lors de la lecture d'une bande magnétique enregistrée en NTSC. On sait que les enregistreurs vidéo fonctionnent en FM et que la transmission s'opère avec une bande latérale inférieure réduite. A une oscillation sinusoïdale dans le domaine vidéo (la sous-porteuse, par exemple) ne correspond pas, dans le spectre FM, une seule *raie* dans une bande latérale, comme en AM, mais plusieurs. La première raie inférieure se trouve dans le spectre vidéo, et la seconde devrait se trouver dans un domaine de fréquences négatives; elle se « replie » donc et vient interférer avec la précédente et avec la porteuse vidéo. Cette interférence crée un *moiré* gênant dont la visibilité croît comme le cube de l'amplitude de la sous-porteuse.

vu sa complexité, nous n'analyserons pas ici. Néanmoins, l'enregistrement des couleurs en NTSC se heurte à certaines difficultés et ne conduit pas toujours, en exploitation courante, à de bons résultats.

d) *Défauts de bande passante. Erreur de quadrature.*

Le principe de transmission du NTSC repose sur le fait que les modulations des signaux de chrominance se font sur des porteuses en quadrature de phase. Ainsi, la projection de la modulation I sur l'axe Q est nulle et inversement, et il ne saurait y avoir de *diaphotie* entre ces deux informations.

En fait, un accident dans la transmission comme une coupure de bande passante peut détruire cette quadrature. En effet, la modulation d'amplitude peut être représentée dans le diagramme de Fresnel par la combinaison de deux vecteurs symétriques, égaux, tournant en sens inverses. Ces deux vecteurs sont les images des raies latérales de la modulation, supposée bien entendu sinusoïdale. Si l'on désigne par F la fréquence porteuse et par f la fréquence de modulation, les fréquences de ces raies latérales sont respectivement $F + f$ et $F - f$.

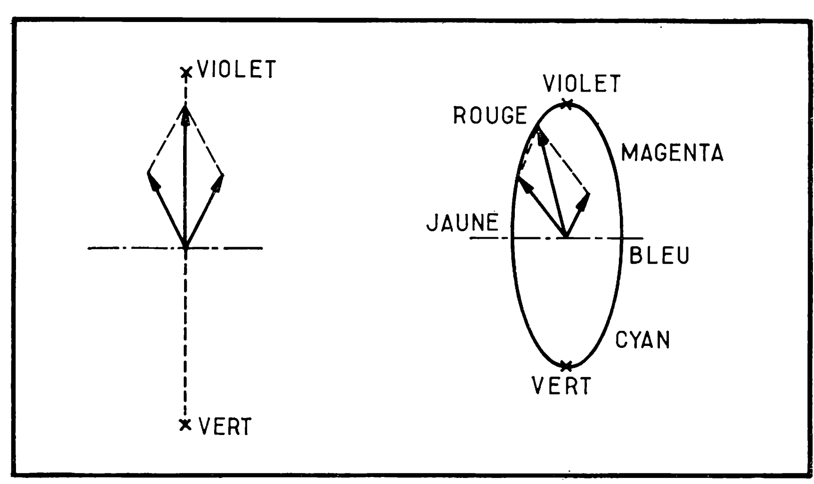


Fig. IX-9. — Défaut de quadrature occasionné par une coupure de bande.

Ces inconvénients — que l'on ne pouvait soupçonner, car les enregistreurs magnétiques ont fait leur apparition plusieurs années après que le système NTSC ait été normalisé aux U.S.A. — ont incité les techniciens américains à développer des équipements auxiliaires comme le *Colortec* que,

Il va de soi qu'une coupure accidentelle de bande passante va atténuer plus ou moins la raie supérieure; dans ces conditions, les deux raies latérales ne sont plus égales, et les vecteurs représentatifs de I et Q ne sont plus perpendiculaires. Les projections de I sur Q et de Q sur I ne sont

plus nulles, et il y a *diaphotie* entre les deux informations.

Imaginons, par exemple, le cas d'une transition selon l'axe Q (du vert au violet), la valeur de I restant nulle. La suppression totale ou partielle de la bande latérale supérieure de Q fait que le vecteur ne reste pas perpendiculaire à l'axe I, mais tourne. La composante I démodulée ne pourra être nulle, et au lieu de passer directement du vert au violet, on y passe en suivant une ellipse dans le plan de chrominance.

On pourrait penser que le fait de transmettre I avec deux bandes latérales dissymétriques entraîne systématiquement une telle erreur de quadrature, mais il n'en est heureusement rien. En effet, cette erreur ne peut se produire que pour des raies latérales inférieures de I, situées à plus de 0,6 MHz de la porteuse (puisque jusqu'à 0,6 MHz les bandes sont symétriques); le signal de diaphotie dans l'information Q est alors hors de la bande passante (limitée à 0,6 MHz). Le filtrage devra donc être particulièrement soigné dans le décodeur.

Dans le cas général d'une coupure de bande accidentelle, il apparaît des franges colorées gênantes le long des transitoires.

e) *Echos.*

Lorsque l'on reçoit la superposition d'une image directe et d'une image fantôme, le phénomène bien connu en noir et blanc se complique d'un défaut chromatique gênant. En effet, le quartz de régénération de la sous-porteuse dans le décodeur se synchronise sur la première salve, mais l'ensemble du plan de chrominance (pour les larges plages colorées) a tourné d'un angle β qui dépend à la fois du retard et de l'affaiblissement du signal réfléchi par rapport au signal direct. Il y a donc obligatoirement une erreur de couleur. Par ailleurs, entre les transitoires directs et fantômes, il y a combinaison de l'ancienne phase et de la nouvelle, ce qui fait qu'une telle image est beaucoup moins exploitable qu'en noir et blanc.

Conclusion sur le système NTSC.

Le procédé n'étant pas toujours capable de transmettre les couleurs fidèlement dans les conditions normales d'exploitation (qui sont très éloignées des conditions idéales reproduites en laboratoire), les constructeurs américains et japonais munissent les récepteurs de *deux* boutons de réglage supplémentaires (pour la teinte et la saturation) laissés à l'usage du téléspectateur.

Or les téléspectateurs moyens, qu'ils soient Américains ou non, ont énormément de difficultés à percer le mystère qui entoure en TV monochrome les réglages de luminosité et de contraste. Je laisse aux auditeurs le soin de réfléchir à la catastrophique cacophonie de couleurs résultant de l'usage inopportun de boutons trop nombreux laissés à la disposition de l'usager...

Il n'empêche que des millions d'Américains et de Japonais bénéficient grâce au NTSC, depuis des années, d'images en couleurs qui leur donnent satisfaction. Et n'oublions pas que, de surcroît, ce système constitue la base de tous ceux qui ont été développés ultérieurement.

II. — SYSTEME PAL

Le gros défaut du système NTSC résidant dans la très grande sensibilité aux distorsions de phase, on imagine en PAL un processus de compensation de ces distorsions au niveau du décodeur.

L'idée fondamentale de l'inventeur du PAL, le Dr Walter Bruch, est d'inverser de 180° la direction de l'axe (R — Y) une ligne sur deux (d'où le nom de *Phase Alternation Line*). Un inverseur est prévu à cette fin dans le codeur de l'émetteur [1].

A la réception, un inverseur semblable permet de retrouver le signal (R — Y) dans la phase correcte. Mais la grande « astuce » consiste dans le fait que, grâce à une ligne à retard, constituant une « mémoire », les signaux de deux lignes successives sont additionnés de telle manière que leurs

(1) C'est en 1928 que, tout jeune, Walter Bruch étudia les bases de la radio en lisant la traduction allemande du premier livre d'Eugène Aisberg « *J'ai compris la T.S.F.* », édité en 22 langues. (*Note de l'éditeur.*)

erreurs de phase, mises en opposition, s'annulent.

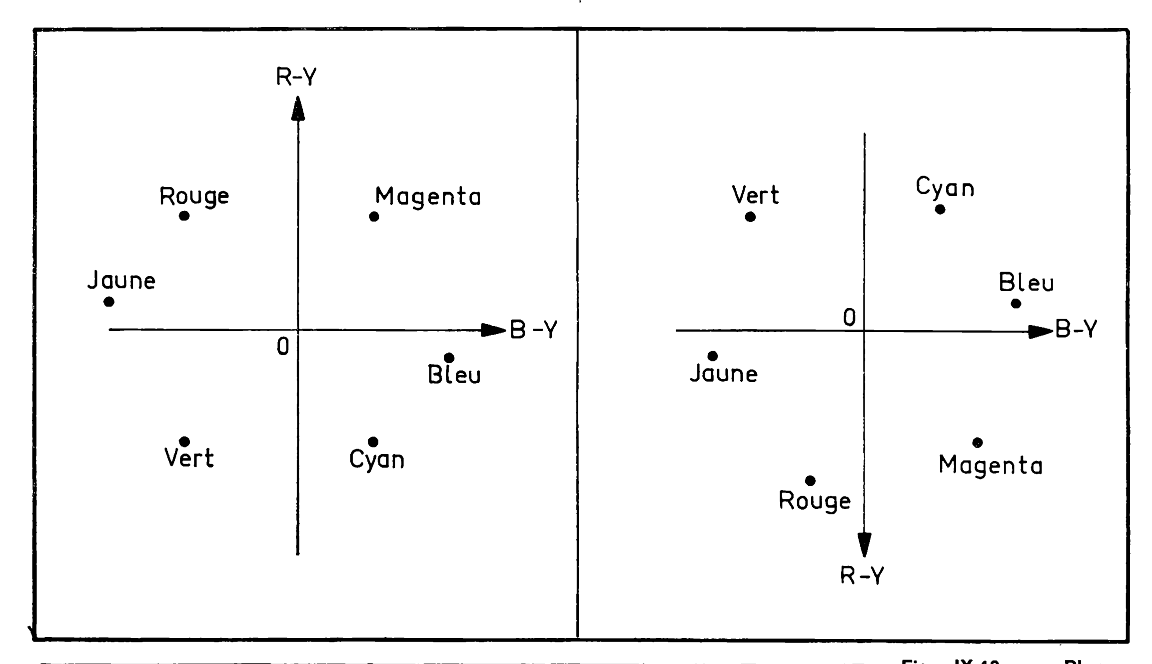
W. BRUCH, en établissant ce principe, s'est fondé sur la loi fondamentale formulée par Henri de FRANCE, loi selon laquelle le contenu de chrominance de deux lignes successives est, dans le cas général, passablement identique.

1) Codage.

On reprend les éléments de base du NTSC en introduisant une variante : *une ligne sur deux, on inverse la polarité de la porteuse* (R — Y) *sans rien changer à celle de* (B — Y).

Dans la suite de l'exposé, uniquement en vue de simplifier les notations, on appellera I = R — Y et Q = B — Y. Il ne faut donc pas oublier que les signaux I et Q du PAL ne sont pas les mêmes que ceux du NTSC. Ils sont notamment — comme dans le SECAM — transmis avec la même bande passante.

Nous verrons qu'il est nécessaire que le décodeur connaisse la polarité de la porteuse I (90 ou 270°); et, à cet effet, on transmet une salve dont la phase est alternativement 180 — 45° et 180 + 45° (*salve alternante*).



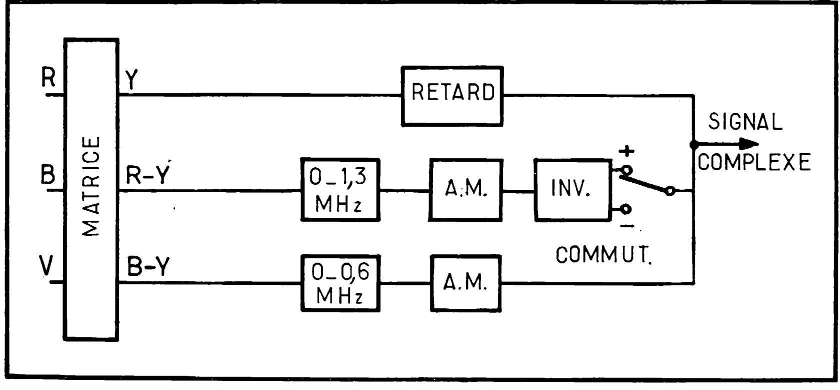


Fig. IX-10. — Plan de chrominance du système PAL différent d'une ligne à la suivante (à gauche + I est en haut, à droite + I est en bas; l'axe Q ne bouge pas d'une ligne à l'autre).

Fig. IX-11. — Schéma synoptique simplifié d'un codeur PAL.

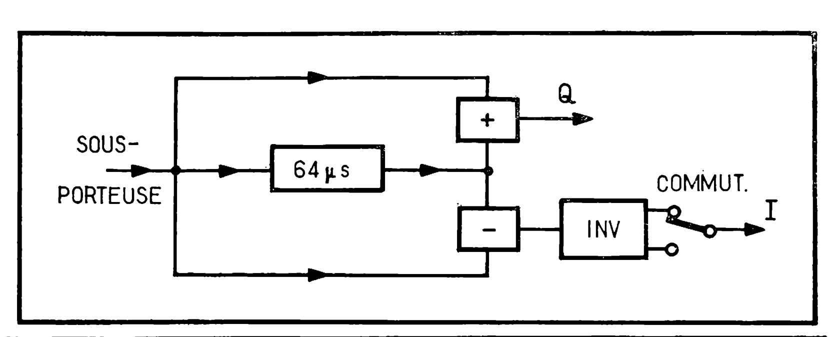


Fig. IX-12. — Schéma synoptique simplifié d'un décodeur PAL standard.

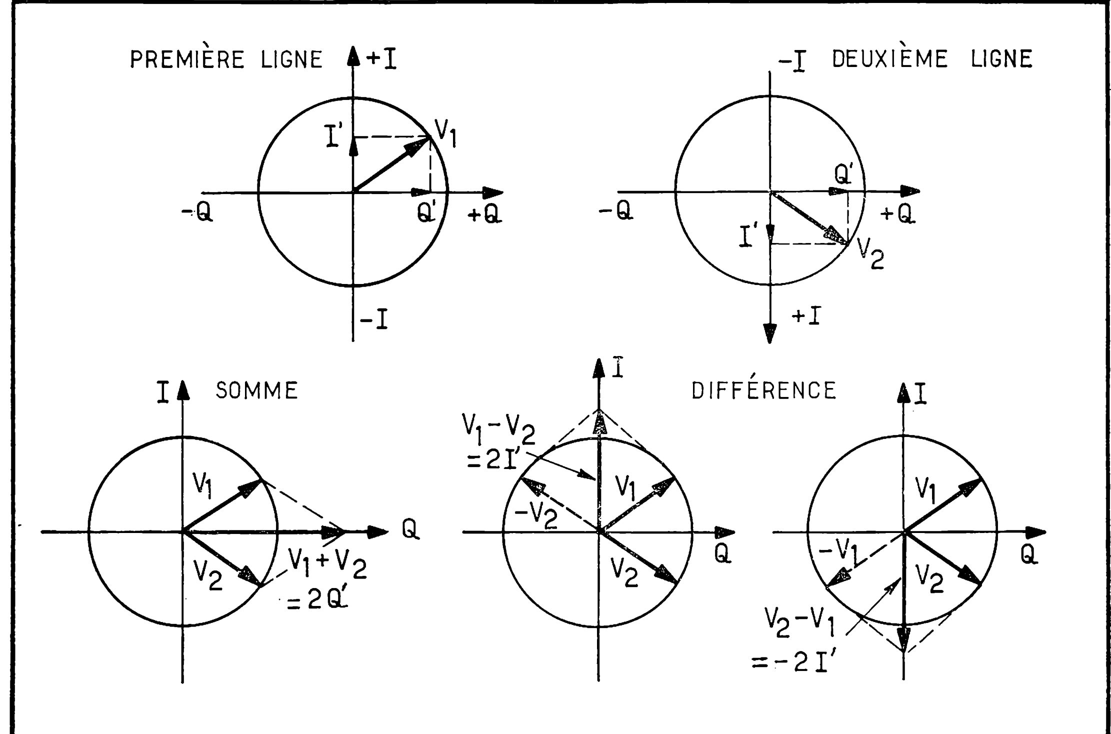


Fig. IX-13. — Addition et soustraction des signaux Q et I de deux lignes consécutives.

2) Décodage.

a) *PAL Standard.*

Imaginons que l'on a à sa disposition simultanément les deux diagrammes de sous-porteuse correspondant aux plans de chrominance des lignes paires et impaires. Pour ce faire, on utilisera une *ligne à retard* dont le temps de propagation (64 µs) est celui du balayage d'une ligne (en standard européen à 625 lignes) et qui emmagasine la sous-porteuse et la restitue une ligne plus tard.

Il apparaît clairement que la somme du vecteur V_1 représentatif d'une ligne et du vecteur V_2 représentant la ligne suivante est égale à 2 Q', alors que la différence est alternativement égale à 2 I' et à — 2 I'. (On obtient la différence des vecteurs en additionnant l'un à l'autre dont on a inversé le signe.)

Supposons maintenant que le vecteur V_1 représentatif de la couleur d'un élément de la première ligne ait pour argument l'angle φ. Mais, affecté d'une distorsion de phase correspondant à l'angle α, il sera déplacé en V_2 (figure IX-14 *a*).

A la ligne suivante (*b*), l'axe I est inversé. Le vecteur V_1, subissant la même distorsion de phase α, sera déplacé en V_2.

Dans le récepteur, l'inversion de l'axe I amènera le vecteur dans une position symétrique par rapport à l'axe Q (*c*). Et son signal sera additionné (*d*) à celui de la ligne précédente, conservé, durant 64 μs, dans la ligne à retard.

Que donne cette addition? Les phases différentielles des deux vecteurs se trouvent *égales en valeur et de signes opposés.* Dans ces conditions, elles s'annulent. C'est là la grande supériorité du PAL sur le NTSC. Il permet de retrouver, à la réception, la teinte exacte de l'image transmise.

Et la saturation? Si nous voulons chercher « la petite bête », nous dirons qu'en raison de la distorsion de phase, elle a subi une légère variation. En effet, comme le montre la figure *d*, le vecteur résultant, au lieu d'être égal au double de V_1, est un peu plus court, étant formé par la diagonale d'un parallélogramme ayant des côtés égaux à $V_1(= V_2)$. Toutefois, aux valeurs admissibles du déphasage α, la différence de saturation résultante S est pratiquement imperceptible.

La sous-porteuse doit être restituée pour la détection comme en NTSC. On démodule ainsi la sous-porteuse de façon synchrone, et une polarité constante du signal I est obtenue en utilisant un inverseur électronique synchronisé par les salves alternantes.

b) *PAL simple.*

Il s'agit d'un décodeur NTSC auquel on adjoint un inverseur de la polarité du signal I détecté, synchronisé par les salves alternantes. Notons que le PAL-standard, qui était désigné à l'origine, dans la littérature, sous le nom de PAL-DL (*Delay-Line*-ligne à retard), est souvent abusivement appelé « PAL de luxe ».

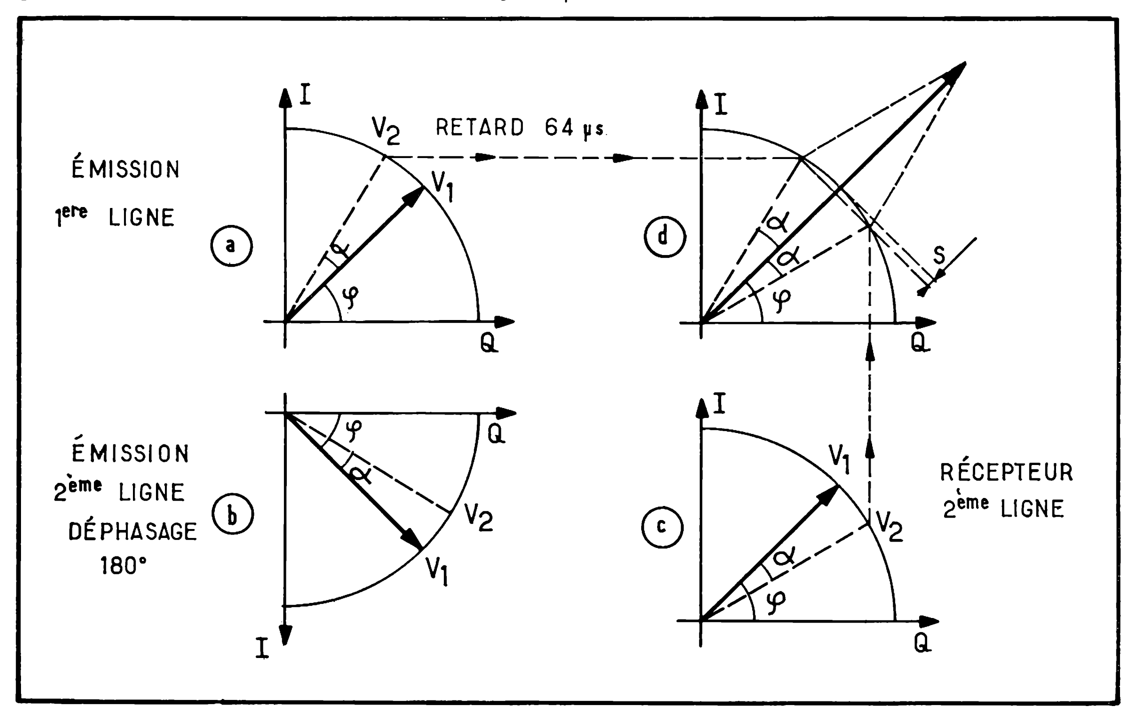


Fig. IX-14. — Si dans une première ligne (a) le vecteur V_1 est, en raison d'une distorsion de phase, déplacé d'un angle α en V_2, le même effet se produira pour la deuxième ligne (b) où l'axe I est inversé. Dans le décodeur du récepteur, le signal de la deuxième ligne subit une nouvelle inversion de l'axe I (c) et est additionné à celui de la première ligne (d).

3) Performances.

a) *Gain différentiel*

La modulation d'amplitude de la sous-porteuse étant la même qu'en NTSC, les performances du système PAL, en ce qui concerne les distorsions d'amplitude, sont exactement les mêmes que celles du NTSC.

b) *Phase différentielle.*

1) PAL standard :

Comme nous l'avons vu en examinant le principe même du PAL, une erreur de phase α est annulée par l'essence même du système, sous réserve, toutefois, que sa valeur ne change pas pour deux lignes successives. A moins d'un incident technique, cette valeur demeure constante dans un circuit de transmission donné où y varie lentement. Aussi peut-on affirmer que, dans le cas général, le PAL permet de reproduire fidèlement les teintes.

2) PAL simple :

L'erreur de teinte causée par une distorsion de phase se traduit par une rotation du plan de chrominance dans des sens opposés d'une ligne à la suivante à cause du changement de polarité périodique de I. Pour des distorsions faibles, l'œil est capable d'*intégrer* ces erreurs de teintes alternatives et symétriques; mais, si la distorsion devient importante, alors qu'en NTSC on assistait au *virage* de la couleur, on pourra ici distinguer des lignes horizontales de couleurs différentes se déplaçant de bas en haut à cause de l'entrelacé de lignes (effet de *persiennes*).

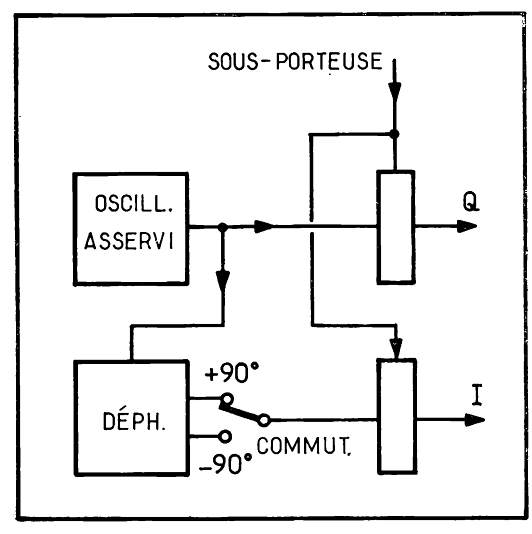


Fig. IX-15. — Schéma synoptique simplifié d'un décodeur PAL simple.

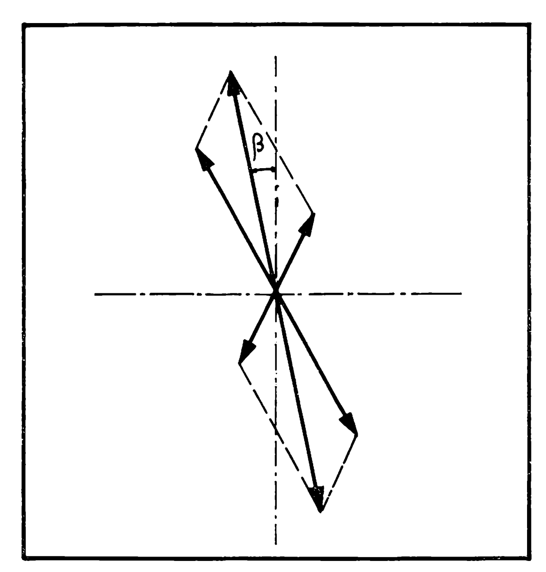


Fig. IX-16. — Elimination du défaut de quadrature par le système PAL.

c) *Enregistrement magnétique.*

Dorénavant, nous ne considérerons que le cas du décodage standard, le PAL simple conduisant à des résultats moins bons ou égaux à ceux du NTSC.

En ce qui concerne les déphasages dus aux irrégularités de vitesse, en prenant le cas, comme nous l'avons fait pour le NTSC, d'une machine synchronisée à la fréquence de lignes, le résultat sera le même que pour la phase différentielle : nous n'avons, en effet, pas formulé d'autre hypothèse que celle affirmant que la distorsion de phase était la même sur deux lignes consécutives. Et dans ces conditions la distorsion de phase différentielle se trouve neutralisée.

De même, la commutation d'une tête à la suivante ne peut entraîner que des erreurs de saturation, mais non plus de teinte, si le décodeur ne comprend plus de quartz pour la regénération de la sous-porteuse, mais un circuit oscillant entraîné.

Cependant, l'effet de moiré, dû uniquement aux fortes amplitudes de sous-porteuse, existe aussi bien en PAL qu'en NTSC.

On utilisera donc, en PAL, les machines magnétiques avec les équipements auxiliaires du type *Colortec* développés pour le NTSC, et avec des résultats généralement satisfaisants.

d) *Coupures de bande.*

Le fait de transmettre une ligne sur deux le signal I et une ligne sur deux le signal — I (symétrique du précédent par rapport à l'origine) *symétrise* également les raies latérales de I. Il y a échange entre bande supérieure et bande inférieure. Le défaut de quadrature β, qui fait que l'angle entre les axes I et Q est 90° + β, se transforme à la ligne suivante en un défaut — β, et l'angle entre les deux axes devient 90° — β. Le fait de prendre somme et différence des deux sous-porteuses annule cette erreur β. Il n'y a donc en PAL standard pas de diaphotie entre les signaux de chrominance lors d'une coupure de bande; on ne peut noter qu'une diminution de la saturation sur la bande partiellement supprimée, c'est-à-dire de la définition chromatique.

e) *Echos.*

De même en ce qui concerne les échos, et également parce que le quartz du décodeur est remplacé par un résonateur entraîné, le phénomène connu en NTSC disparaît.

f) *Particularités du système PAL.*

Le système PAL standard est donc bien supérieur au NTSC en ce qui concerne les accidents de propagation ou de transmission.

On a reproché au PAL de réduire la définition chromatique verticale (puisque les informations de chrominance sont exploitées deux fois, sur deux lignes consécutives); ce reproche n'a aucun sens, si l'on veut bien se souvenir que la définition chromatique horizontale est 4 à 5 fois inférieure à la définition de luminance. Nous verrons plus loin que le système SECAM, bien avant, avait déjà résolu d'utiliser cette redondance de définition pour augmenter la protection des informations de couleurs.

Par contre, le récepteur PAL standard, qui élimine en principe l'effet des distorsions de phase (à condition qu'elles ne changent pas d'une ligne à la suivante), risque d'en introduire de nouvelles qu'il ne saurait corriger. En effet, le temps de propagation de la ligne à retard, qui sert à emmagasiner la sous-porteuse pendant le temps de balayage d'une ligne, doit être *exact et constant* de façon que l'on ait une parfaite concordance de phase entre la porteuse Q directe et la porteuse Q retardée. Un décalage de phase introduit la même erreur de teinte que dans le NTSC.

Conclusions sur le système PAL.

Plus commode à exploiter (facilité d'enregistrement magnétique, emploi possible d'équipements présentant des défauts de phase) que le NTSC, le PAL procure en général des images de meilleure qualité, mais son récepteur est plus complexe, donc plus délicat.

Le téléspectateur n'a plus qu'un réglage supplémentaire à effectuer en plus des réglages classiques en noir et blanc : celui de la saturation des couleurs.

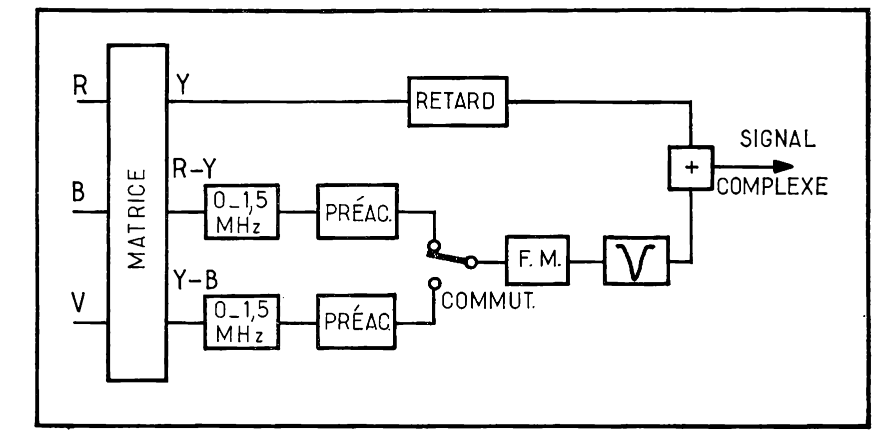
Notons, enfin, que le sigle PAL s'applique à des catégories de récepteurs bien différentes : le PAL standard qui bénéficie de tous les avantages énumérés et le PAL simple qui donne des résultats inférieurs ou égaux à ceux du NTSC.

III. — SYSTÈME SECAM

1) Codage.

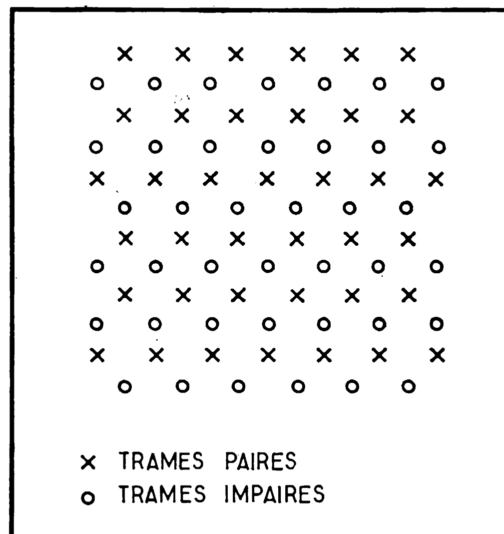
Le système SECAM rejette d'emblée la double modulation en quadrature; le principe peut se résumer ainsi : *si l'on veut éviter qu'il y ait interaction entre les signaux de chrominance, il ne faut pas les transmettre en même temps; si l'on veut*

Fig. IX-17. — Schéma synoptique simplifié d'un codeur SECAM.



★

Fig. IX-18. — Entrelacé de points de sous-porteuse propre au système SECAM.



éviter qu'il y ait interaction entre luminance et chrominance, il faut — la luminance modulant la porteuse principale en amplitude — que les signaux de chrominance modulent la sous-porteuse en fréquence.

La sous-porteuse transmet, à un instant donné, un des signaux de chrominance : par exemple (R — Y); à l'instant suivant, elle transmet l'autre : (B — Y). La commutation doit se faire pendant un intervalle d'effacement (afin que le parasite n'apparaisse pas sur l'écran). Par ailleurs, pour transmettre le maximum d'informations, il est nécessaire que la période de récurrence des séquences (R — Y) et (B — Y) soit aussi courte que possible. C'est donc *à chaque nouvelle ligne que le signal modulant la sous-porteuse sera modifié.*

Le choix de la fréquence de repos de la sous-porteuse répond à des critères tout à fait différents de ceux du NTSC. En effet, l'usage de la FM détruit les structures de points fixes. C'est une longue étude expérimentale qui a défini le meilleur compromis.

La fréquence de repos est choisie égale à un multiple entier de la fréquence de lignes (282 fois pour R — Y et 272 fois pour B — Y); en l'absence de modulation, les points sont alignés verticalement et par conséquent très visibles. On pratique alors un « offset » artificiel en inversant la phase de la sous-porteuse une ligne sur trois et à chaque trame. Cet *entrelacé* de points se conserve avec une visibilité minimale quelle que soit la modulation FM.

Les signaux de chrominance sont préaccentués, et la sous-porteuse est « mise en forme » par un filtre dont la forme rappelle celle d'une cloche à l'envers (filtre en *anticloche*) dont nous verrons bientôt l'utilité.

Signalons encore que les signaux (R — Y) et (B — Y) sont transmis avec des *polarités opposées,* c'est-à-dire que l'excursion de fréquence causée par un signal (R — Y) d'un signe donné est de sens opposé à celle créée par un signal (B — Y) du même signe. L'étude théorique confirmée par l'expérimentation a montré, en effet, que l'on réduisait ainsi la visibilité de la sous-porteuse dans l'image compatible tout en accroissant la protection du signal chromatique contre le bruit.

Nous verrons que le décodeur — comme celui du PAL — doit « savoir » quelle est l'information transmise, R — Y ou B — Y. On transmet donc une information supplémentaire, qui remplace le salve alternante, l'information d'*identification des couleurs* composée de sous-porteuse modulée par du vert

$R - Y < 0$
$B - Y < 0$

(Voir la position du vert dans le diagramme de chrominance.)

durant neuf lignes placées dans l'intervalle de suppression de trame. Les signaux de chrominance transmis sont alors :

$C_r > 0$
$C_b < 0$

puisque, comme il vient d'être précisé, ces signaux sont émis avec des polarités contraires.

2) Décodage.

Dans la partie chrominance du décodeur, on trouvera tout d'abord un *filtre en cloche* compensant en amplitude et en phase l'action du filtre en anticloche du codeur; autrement dit, l'effet des deux filtres s'annule. Pourquoi les avoir mis? Si l'on introduit entre les deux filtres, par exemple sur le chemin de propagation, un signal étranger (brouilleur, bruit, parasite), la bande passante du récepteur pour ce signal étranger est celle (faible) de la cloche, alors que pour le signal utile, précorrigé par l'anticloche, elle est maximale. On accroît ainsi la *protection* des signaux de chrominance contre les signaux étrangers. L'effet de la cloche vient donc parfaire celui de la désaccentuation.

La sous-porteuse est ensuite dirigée vers une ligne à retard dont le temps de propagation est égal à celui du balayage d'une ligne, soit 64 μs pour une image à 625 lignes. On sait que SECAM signifie *SEquences de Couleurs Avec Mémoire,* et nous avons vu déjà comment les signaux de chrominance sont transmis séquentiellement et non simultanément; la ligne à retard est la *mémoire.* De sorte que, si la sous-porteuse à l'issue de cette ligne à retard est modulée par C_r, la sous-porteuse présente à l'entrée est modulée par C_b et vice versa. Un inverseur électronique, automatiquement déclenché par les impulsions de retour lignes, sert à aiguiller alternativement l'entrée et la sortie de la ligne à retard vers les démodulateurs R — Y et B — Y composés de limiteurs, discriminateurs et cellules de désaccentuation.

Il va de soi que le décodeur doit « savoir » quelle est l'information de chrominance transmise (sinon il risque d'intervertir systématiquement C_r et C_b) de même qu'il doit « savoir » si le programme reçu est monochrome ou polychrome; en effet, en l'absence de sous-porteuse, les limiteurs, conçus pour délivrer une puissance constante, indépendante du signal d'entrée, alimentent les *discriminateurs* en bruit.

C'est alors qu'interviennent les signaux d'identification des couleurs auxquels nous avons déjà fait allusion. Ces signaux sont démodulés, et on forme le signal de synchronisation de couleur :

$S = (C_r - C_b)$ que l'on intègre dans le temps. Le signal de synchronisation de couleur est positif si l'inverseur fonctionne correctement, nul s'il n'y a pas de couleur, négatif si le décodeur intervertit C_r et C_b. La polarité de ce signal S permet de synchroniser l'inverseur et son absence, de bloquer la partie chrominance du décodeur.

3) Performances.

a) *Gain différentiel.*

L'amplitude de la sous-porteuse ne transmettant aucune information et étant limitée dans le décodeur, le défaut de gain différentiel n'a aucun effet sur la fidélité des couleurs.

b) *Phase différentielle.*

Les informations de chrominance sont transmises en modulation de fréquence. Le déphasage de l'ensemble de la chaine de transmission passe de φ à $\varphi + \Delta\varphi$ dans le temps Δt par effet de phase différentielle. Il naît donc une excursion de fréquence parasite :

$$\Delta F = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$$

Cette excursion étant *parasite* n'est pas démodulée intégralement par le décodeur, mais subit le double effet de la cloche et

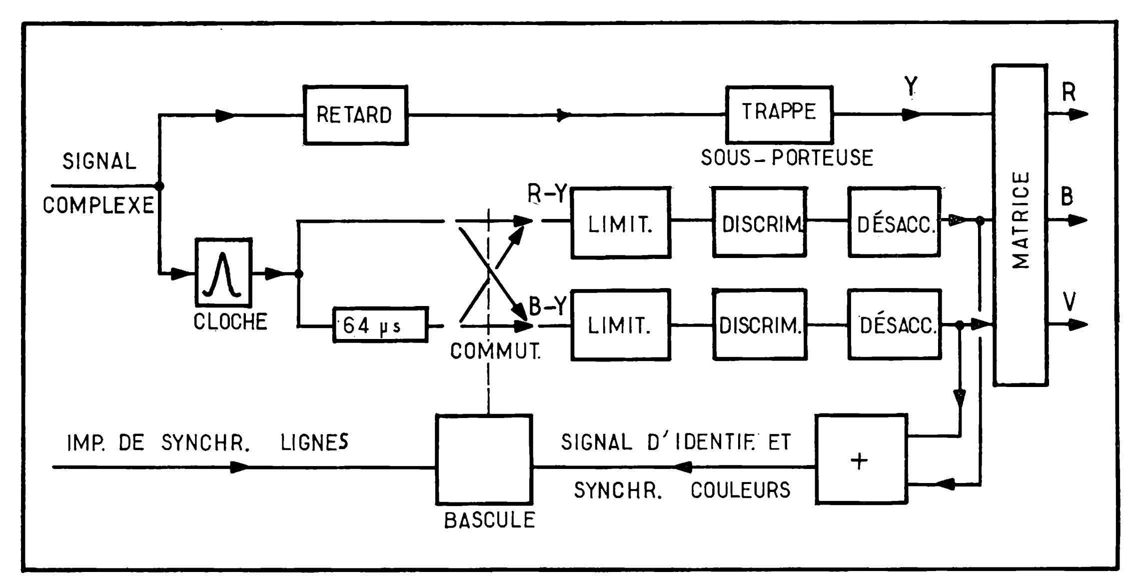


Fig. IX-19. — Schéma synoptique simplifié d'un décodeur SECAM.

de la désaccentuation. En SECAM, le défaut de phase différentielle ne peut affecter que les transitoires et non les larges plages. On considère généralement qu'un écart total de ± 25° conduit à un effet juste perceptible (soit une tolérance cinq fois plus grande qu'en NTSC, encore que le phénomène soit très différent, puisqu'il n'affecte pas en SECAM l'ensemble de l'image).

c) *Enregistrement magnétique.*

Le SECAM, grâce à l'utilisation de la FM, est le *système idéal pour l'enregistrement magnétique.*

En effet, une imprécision de vitesse Δv entraîne une excursion de fréquence parasite ΔF

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{\Delta v}{v}$$

L'effet n'est pas cumulatif, et cette excursion parasite n'est pas démodulée intégralement. La précision usuelle de vitesse de 0,3 % est très largement suffisante.

De même, la commutation d'une tête à la suivante n'est accompagnée d'aucun phénomène de distorsion, puisque la chrominance, transmise purement en FM, est insensible aux irrégularités de phase comme d'amplitude.

Enfin, l'amplitude de la sous-porteuse est faible et varie peu, ce qui élimine les défauts de moiré.

On utilise, en SECAM, les machines de studio « noir et blanc » sans aucune modification, sans appareils auxiliaires. On emploie même des enregistreurs semi-professionnels portatifs à performances réduites et qui donnent, à moindres frais, d'excellentes images en couleurs.

d) *Défauts de bande passante.*

En aucun cas, il ne peut y avoir en SECAM diaphotie entre les signaux de chrominance. Un défaut de bande passante produit, évidemment, une diminution de définition, mais encore faut-il que la limitation soit plus sévère que celle que doit subir obligatoirement le signal sous l'effet de la « cloche ». Pour des défauts usuels, (émetteurs fatigués, récepteurs mal alignés), l'effet sera à peine visible.

e) *Echos.*

L'effet d'un écho sur une image SECAM est identique à l'effet sur une image monochrome.

f) *Sensibilité au bruit.*

Le fait que le rapport excursion de fréquence sur fréquence maximale de modulation est faible diminue la protection

contre le bruit. Pour pallier cet inconvénient on procède, à l'émission, à une mise en forme de la sous-porteuse (voir plus haut, filtre en anticloche).

C'est dire qu'il y a intérêt à employer des collecteurs d'ondes à gain élevé dès qu'il s'agit d'installations se trouvant dans les zones marginales de la portée utile des émetteurs.

Conclusions sur le système SECAM.

Le système SECAM présente bien des aspects séduisants; il faut savoir que la maintenance des équipements professionnels ne pose pas de problèmes particuliers par rapport à celle du noir et blanc (si ce n'est qu'il y a évidemment plus de matériel), et le service des téléviseurs, en ce qui concerne la partie purement SECAM (c'est-à-dire la partie chrominance du décodeur) est réduit, parce que ces derniers sont plus *simples* que ceux des procédés concurrents.

Il n'y a aucun mystère, aucune miracle dans ce système. Il a été très longtemps à l'étude, et des spécialistes éminents comme de France, Cassagne et Melchior ont apporté des améliorations constantes à un système qui a connu de nombreuses variantes depuis son invention en 1956.

La version que nous avons décrite est le SECAM III optimal, à la détermination duquel le Professeur Fagot a apporté également sa science des techniques de télécommunications. C'est donc dans sa pleine maturité, ayant subi tous les essais et ayant été exploité expérimentalement en vraie grandeur, que le système SECAM est devenu la norme officielle d'un certain nombre des pays du monde.

C'est aussi, et il faut bien le dire, le système le plus simple. La simplicité du système est un facteur essentiel d'économie et de stabilité. Mais, comme disait Christophe Colomb, « il fallait y penser ».

⁂

Aucun des trois systèmes n'est parfait, car la perfection n'est pas de ce monde. Dans des conditions tout à fait normales d'exploitation, ils assurent tous les trois une excellente reproduction des images. Leurs performances diffèrent lorsque la chaîne de transmission subit des perturbations. Cela ne doit pas nous empêcher d'admirer les trésors d'ingéniosité des créateurs du NTSC, du SECAM et du PAL que nous citons ainsi dans l'ordre chronologique.

SECAM OU PAL?...

Les chapitres qui suivent traitent de la composition et de la mise au point des téléviseurs couleurs. Pour commencer, le chapitre X est consacré à l'analyse d'un récepteur SECAM. Dans le chapitre XI est analysé le schéma d'un téléviseur PAL. Selon le système qui l'intéresse, le lecteur pourra étudier l'un de ces chapitres en omettant l'autre, les deux contenant, d'ailleurs, certains passages et dessins identiques.

De même, si le chapitre XII décrit des réglages de pureté et de convergence communs à tous les systèmes, les autres réglages particuliers au SECAM font l'objet du chapitre XIII et ceux du PAL sont traités dans le chapitre XIV. L'un des deux peut donc être omis par le lecteur qui ne s'intéresse qu'à l'un des deux systèmes.



CHAPITRE X

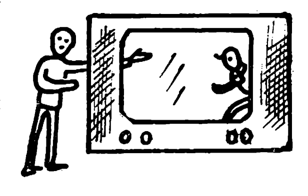
Grâce aux connaissances acquises au cours des chapitres qui précèdent, nos deux jeunes amis peuvent aborder la dissection d'un récepteur d'images en couleurs. Ils le feront en passant successivement en revue les éléments suivants :

Amplificateur de fréquence intermédiaire. — Lignes à retard. — Bascule. — Limiteurs. — Oscillateurs. — Amplificateurs vidéo. — Suppression de la couleur. — Transistorisation.

ANALYSE D'UN RÉCEPTEUR SECAM

Cela commence avec la FI.

IGNOTUS. — Mon cher ami, la conférence du Professeur Radiol m'a profondément intéressé. Mais il lui manquait, à mon avis, quelque chose.



CURIOSUS. — Je crois deviner, mais achevez votre pensée.

IG. — Eh bien, j'ai appris beaucoup de choses théoriques sur les différents systèmes de télévision compatibles et sur leurs propriétés et j'aurais aimé maintenant que nous entrions un peu plus dans la « chair » du téléviseur qui nous intéresse le plus, c'est-à-dire du récepteur SECAM.

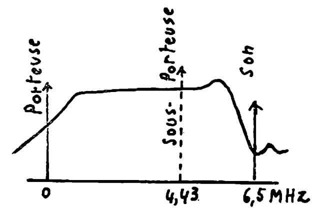
CUR. — Notez bien que la conférence d'hier était une conférence d'information destinée à un public très large et que le Professeur Radiol ne pouvait pas entrer dans les détails.

IG. — Bien sûr. Mais en fait, si l'on met le tube-image de côté, il n'y a que la partie vidéo qui distingue un téléviseur polychrome d'un appareil classique.

CUR. — Vous avez à la foi tort et raison.

IG. — ???

CUR. — En théorie, bien sûr, jusqu'à la détection, rien ne distingue les deux récepteurs. Et pourtant, le constructeur a quelques précautions à prendre pour l'amplificateur FI, par exemple.



IG. — Expliquez-vous.

CUR. — Volontiers. En télévision monochrome, l'allure de la courbe de réponse FI aux hautes fréquences n'est pas très critique : l'important est que la porteuse son soit bien « réjectée » comme on dit. Mais en couleur, cette zone du spectre est précisément celle où est située la sous-porteuse; la courbe de réponse de l'amplificateur FI ne doit donc pas tomber trop brutalement; il est souhaitable que le gain reste constant dans toute la bande chrominance.

IG. — Je devine que cet amplificateur FI sera plus difficile à réaliser.

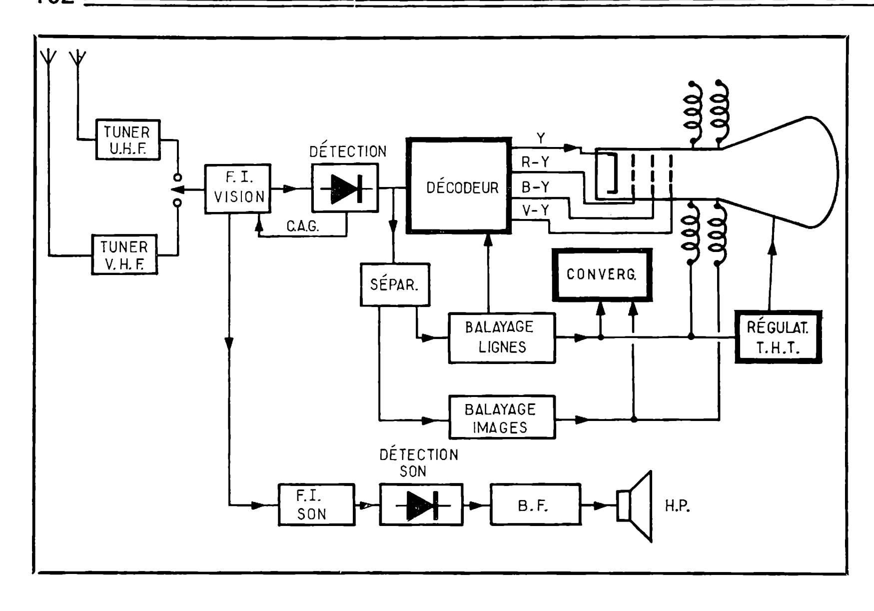


Fig. X-1. — Composition synoptique d'un récepteur SECAM. Les éléments qui ne font pas partie d'un téléviseur monochrome et qui, par conséquent, sont particuliers à la couleur, sont représentés en trait plus gras.

Cur. — A peine. Car la porteuse son est à 6,5 MHz de la porteuse image, et, grâce à l'action de la « cloche », l'énergie de la sous-porteuse de couleur est concentrée autour de 4,3 MHz. Il y a donc suffisamment d'espace dans le spectre pour permettre une réjection correcte de la porteuse son sans abimer la bande chrominance. Je voulais simplement dire qu'il fallait être conscient de cette différence. De même, en ce qui concerne la commande automatique de gain.

Ig. — Autrement dit, la C.A.G.

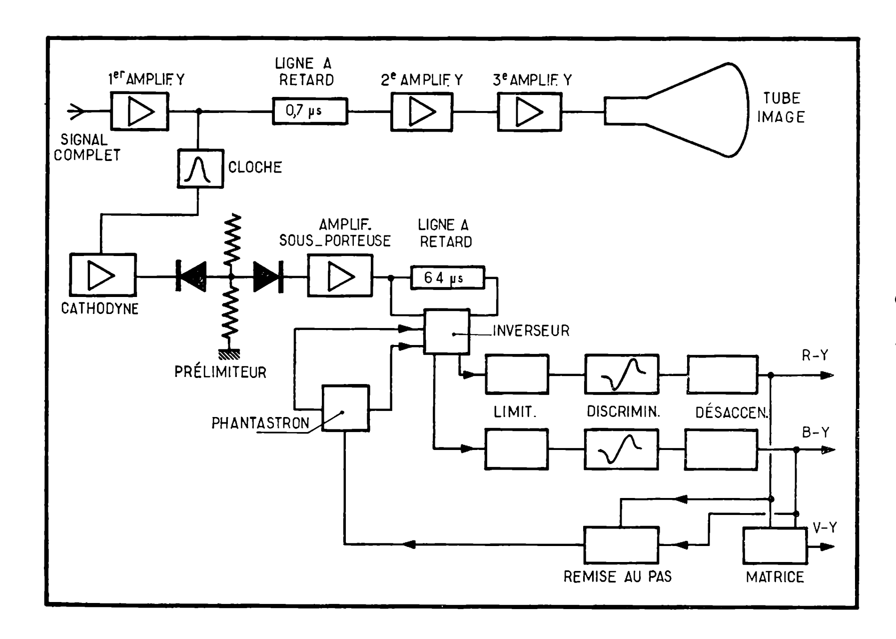


Fig. X-2. — Un décodeur SECAM — on le voit ci-contre — est un ensemble assez complexe.

Cur. — Oui. Attendu que l'amplitude de la sous-porteuse est limitée dans le décodeur, si le signal vidéo détecté est trop faible parce que la C.A.G. n'est pas suffisamment efficace, le rapport luminance-chrominance sera lui aussi trop faible.

Ig. — Et, par conséquent, la saturation trop forte. De sorte que, quand on dit que le système SECAM transmet fidèlement la saturation des couleurs...

Cur. — ... on fait implicitement l'hypothèse que la C.A.G. est efficace.

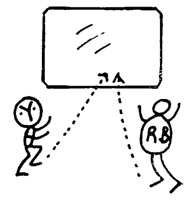
Ig. — Et même plus efficace que sur un téléviseur monochrome?

Décodeur = luminance + chrominance.

Cur. — Oui. Venons-en maintenant au décodeur, si vous le voulez bien.

Ig. — J'ai compris quelles étaient ses fonctions. Pouvez-vous m'expliquer comment on les réalise?

Cur. — Ce problème — étant donnée une fonction, comment la réaliser avec des circuits — est du ressort de la radioélectricité générale. Nous allons analyser, si vous le voulez bien, pas à pas le schéma d'un décodeur. Il se compose, très grossièrement, de deux parties : la partie luminance et la partie chrominance.



Ig. — C'est bien évident, et nous pouvons laisser la partie luminance de côté, puisque c'est un amplificateur vidéo des plus classiques.

Cur. — Vous vous trompez, mon cher ami, il n'est pas classique du tout, car il a des fonctions nouvelles à accomplir : en particulier, il doit retarder l'information de luminance d'à peu près 0,7 µs de façon que, sur l'écran du téléviseur, elle arrive en même temps que l'information de chrominance, transmise à bande étroite.

Ig. — Pardon, mais c'est le *codeur,* à l'émission qui accomplit ce retard et non le décodeur du récepteur.

Cur. — Vous ne vous trompez pas : le codeur, lui aussi, comprend une ligne à retard dans le canal luminance. Et les informations de luminance et de chrominance sont en phase à l'issue dudit codeur. Cela ne dispense cependant pas de la nécessité d'une ligne à retard pour le signal de luminance dans le décodeur du récepteur.

Ig. — Mais n'aurait-on pas pu mettre dans le codeur une ligne à retard deux fois plus longue, afin d'économiser celle du récepteur?

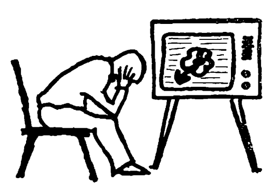
Cur. — Cette idée est tellement évidente, mon cher ami, qu'on y a pensé bien avant vous.

Ig. — Et comme d'habitude, l'expérience prouve qu'elle est totalement idiote.

Cur. — Ne vous fâchez donc pas, Ignotus, puisque je vous dis que des personnalités éminentes du monde technique ont eu cette idée.

Ig. — Allons-y, démolissez-la maintenant.

Cur. — Cette méthode serait parfaitement valable si la sous-porteuse n'était pas modulée en amplitude. Mais un transitoire chromatique s'accompagne souvent (presque toujours) d'un transitoire de luminance. Si vous retardez la luminance de 0,7 µs, tout se passera bien dans le téléviseur polychrome, mais n'oublions pas le malheureux possesseur d'un téléviseur monochrome. Que verra-t-il?



Ig. — Je comprends. Dans l'image compatible, le signal de chrominance arrive en même temps que le signal de luminance (puisqu'il n'y a

pas de décodeur). Et la luminance « préretardée » au codage est décalée vers la droite de l'image d'à peu près $\frac{0,7\ \mu s}{64\ \mu s}.40$ cm soit environ 4 mm pour un écran de 40 cm de côté horizontal.

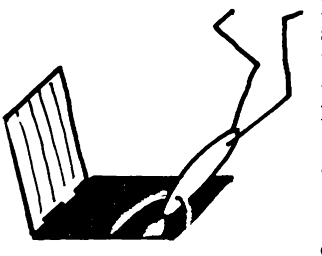
Cur. — Si l'amplitude de la sous-porteuse n'était pas modulée, cela n'aurait aucune importance, encore une fois. Mais la combinaison de la préaccentuation vidéo et de la mise en forme en cloche crée une modulation d'amplitude, et on verra très nettement deux transitoires séparés de 4 mm sur l'image noir et blanc.

Ig. — Un peu comme un écho.

Cur. — Ou, plus exactement, le contraire d'un écho, car l'image principale (luminance) se trouve à droite de l'image fantôme (sous-porteuse). Mais l'amplificateur de luminance a encore une autre fonction à accomplir. Il doit absorber la sous-porteuse, car sa présence perturberait l'image en couleurs.

Dans les méandres de la luminance.

Ig. — Le Professeur Radiol y a fait allusion, mais j'ai mal compris. On dit, en effet, que le système est compatible, c'est-à-dire que la visibilité de la sous-porteuse est négligeable.



Cur. — C'est vrai pour les récepteurs monochromes dans lesquels l'amplificateur FI présente un certain affaiblissement à la fréquence de sous-porteuse. Dans le récepteur couleurs, cet amplificateur présente une courbe de réponse plate dans la bande chromatique. Comme il est de toute façon de conception spéciale, il ne coûte rien de rendre l'image parfaite en prévoyant une *trappe* de sous-porteuse.

Ig. — Donc l'amplificateur de luminance est un amplificateur vidéo auquel on a ajouté une ligne à retard de 0,7 µs et un circuit bouchon, « piège » de sous-porteuse.

Cur. — C'est presque ça. Examinons la figure 3. Le signal détecté complexe subit une préamplification de la pentode V_1. Le signal recueilli sur l'anode est dirigé d'une part vers la ligne à retard, d'autre part vers un circuit oscillant accordé sur la fréquence centrale de la sous-porteuse et qui prélève cette dernière tout en accomplissant la fameuse fonction « cloche ». Je vous fais remarquer en passant que l'insensibilité du système SECAM aux distorsions différentielles d'amplitude permet de prélever la sous-porteuse à haut niveau, c'est-à-dire d'économiser un amplificateur. Dans les systèmes à modulation d'amplitude de la sous-porteuse, il faut dès la détection séparer la sous-porteuse du signal complexe.

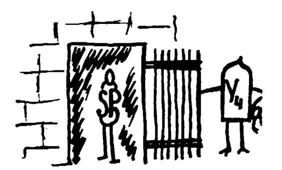
La ligne à retard est adaptée, sa bande passante corrigée par une petite inductance, et le signal retardé est appliqué à la grille d'une pentode V_2 qui fonctionne à la fois en amplificateur (son anode conduit à la séparatrice) et en cathodyne : la cathode est chargée par un circuit oscillant (qui atténue la sous-porteuse) et un potentiomètre (qui sert au réglage du contraste). Le signal, dont l'amplitude est ainsi réglable, est appliqué à la grille d'une pentode V_3 dont la polarisation continue constitue le réglage de lumière et sur laquelle est effectuée la restitution de composante continue. Un circuit sélectif, en contre-réaction dans la cathode, achève de débarrasser le signal des traces de sous-porteuse modulée, et l'anode est connectée aux trois cathodes du tube-image par l'intermédiaire de potentiomètres qui servent à doser l'excitation des

Fig. X-3. — Amplificateur de luminance

canons et qui permettent ainsi de compenser les rendements différents de luminophores.

Ig. — Et la triode V_4?

Cur. — Elle délivre la sous-porteuse (mise en forme par la cloche) sous amplitude constante et basse impédance, à la partie chrominance du décodeur.



Ig. — Celle-ci doit être bougrement compliquée...

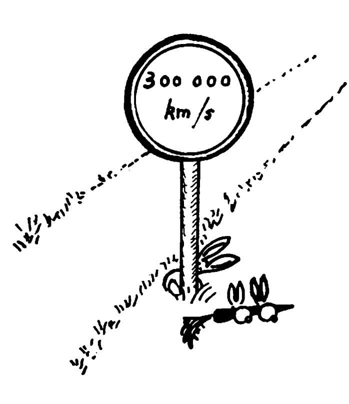
Anatomie et physiologie des lignes à retard.

Cur. — On peut distinguer les fonctions suivantes : amplification et prélimitation de la sous-porteuse, retard de 64 μs et inverseur électronique avec sa bascule de commande, limiteurs et discriminateurs, désac-

centuation, matrice d'élaboration du signal V — Y, circuit de synchronisation et de blocage couleur. Voyons-les l'une après l'autre.

La pentode de la figure X - 4 amplifie la sous-porteuse déjà mise en forme par la cloche après limitation d'amplitude par les deux diodes en série dans la grille. L'anode est reliée d'une part à la ligne à retard de 64 μs par l'intermédiaire d'un transformateur adaptateur d'impédances, d'autre part à une des entrées de l'inverseur électronique à quatre diodes en pont.

IG. — Comment peut-on réaliser une telle ligne à retard? Si je me souviens bien, le produit de la bande passante par le retard à obtenir détermine le nombre d'éléments inductance-capacité de la ligne, qui doit être énorme.



CUR. — Vous avez raison parce que vous croyez qu'elle est réalisée à partir de tels éléments. En fait, on utilise une technique très différente. Les ondes électromagnétiques sont difficiles à retarder parce qu'elles vont très vite.

IG. — On ne saurait aller plus vite en effet, puisqu'elles se propagent à la vitesse de la lumière : 300 000 km/s.

CUR. — Dans le vide. Dans un système à retard, on les ralentit. Mais on peut travailler avec des ondes encore beaucoup plus lentes, qui se propagent par exemple à la vitesse de quelques kilomètres par seconde seulement.

IG. — Oh là là! Cela fait une sérieuse différence. Comment fait-on?

CUR. — Ne connaissez-vous pas des ondes lentes, Ignotus?

IG. — Certes; les ondes sonores, par exemple...

CUR. — Justement, ou pour être plus général, les ondes mécaniques.

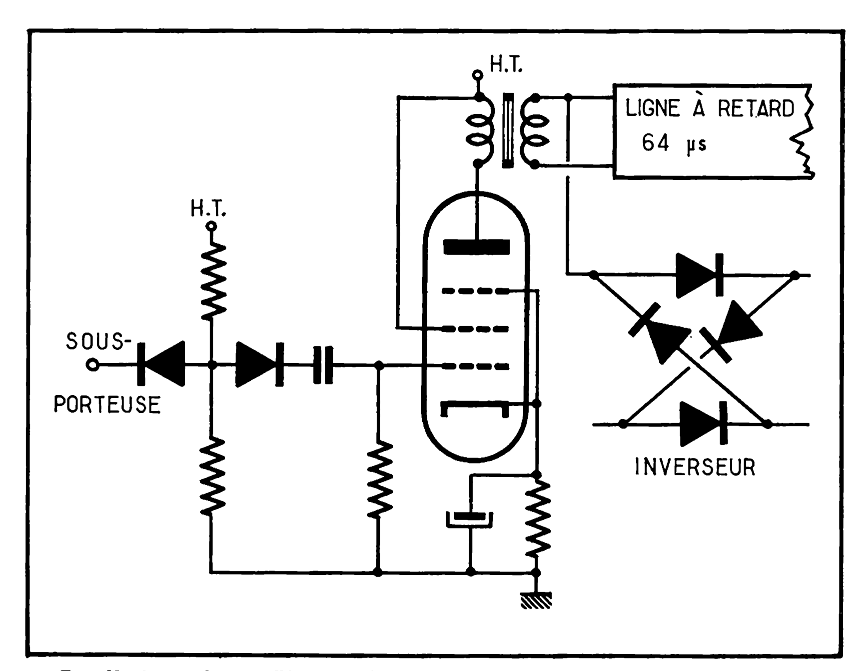
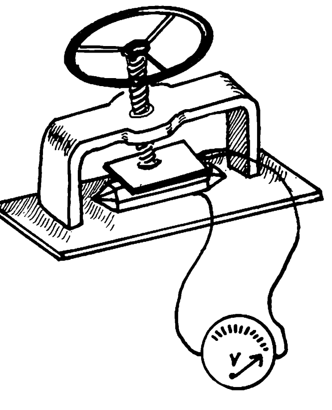


Fig. X - 4. — Avant d'être appliquée à l'entrée de la pentode V_1 figurant ci-dessus, la sous-porteuse est limitée en amplitude par les deux diodes montées en opposition.

Or, il existe des substances, dites piézo-électriques, qui se déforment mécaniquement lorsqu'on les excite électriquement.

IG. — Vous faites allusion aux membranes de haut-parleurs?

CUR. — Elles répondent à la définition, mais ce ne sont pas des substances, ce sont des objets fabriqués. Je pensais au quartz et à une série de céramiques comme certains titanates polarisés. Réciproquement, d'ailleurs, excitées mécaniquement, ces substances deviennent des générateurs électriques.



IG. — J'aurais dû y penser. C'est même pour cette raison que l'on fait des oscillateurs à quartz, car les systèmes mécaniques cristallins ont beaucoup moins de pertes que les systèmes électriques; on peut donc obtenir de très grandes surtensions.

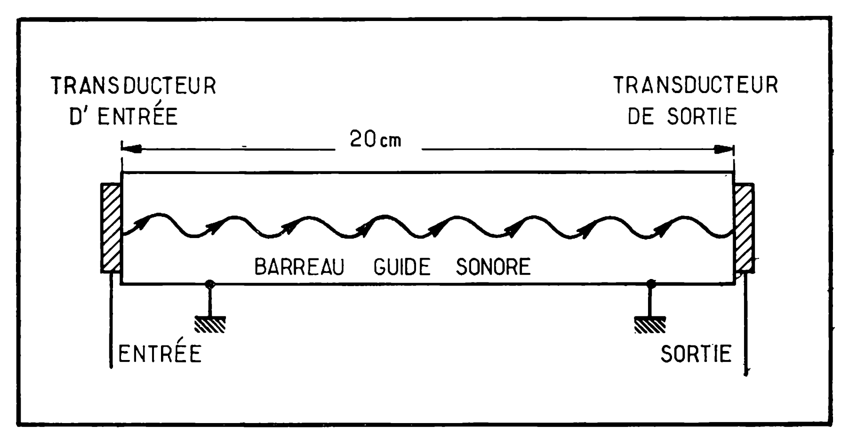


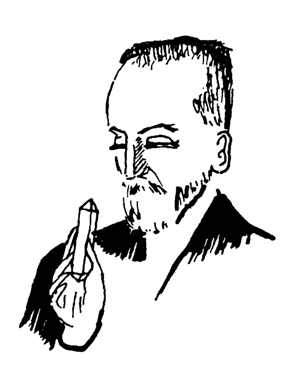
Fig. X-5. — Anatomie d'une ligne à retard.

CUR. — Ici, nous ne recherchons pas la surtension pour elle-même, et on n'utilise la substance piézo-électrique que pour transformer l'onde électrique en onde mécanique. A la fréquence de la sous-porteuse, il s'agit d'un ultra-son parfaitement inaudible; on le fait se propager dans un barreau de fer d'une vingtaine de centimètres à l'extrémité duquel on a soudé une pastille piézo-électrique absolument identique à la première.

IG. — On peut souder du quartz sur du fer?

CUR. — On utilise du titanate de plomb dont le point de Curie est élevé.

IG. — Oh là là, vous voulez mettre des substances radio-actives dans un téléviseur. Mais c'est très dangereux!!!



CUR. — Le célèbre physicien Pierre CURIE (qui a justement étudié la piézo-électricité) ne s'est pas occupé uniquement de radio-activité. Il a fait des études sur le ferromagnétisme et la ferro-électricité. Et il a découvert que, lorsque l'on chauffe une substance piézo-électrique par exemple au-dessus d'une certaine température — point de Curie — elle perd ses propriétés. Mais en utilisant une soudure spéciale, fondant à plus basse température que l'étain, on soude aisément le titanate de plomb sur le fer, assurant un couplage mécanique parfait.

IG. — De sorte que la ligne à retard est un barreau de fer de 20 cm de long aux deux extrémités duquel sont soudées des pastilles de titanate de plomb.

Cur. — Et la longueur de 20 cm correspond à un trajet de 64 µs de l'onde ultra-sonore. Dans le vide, avec une onde électromagnétique, le trajet correspondant au même retard aurait été de 20 km.

Ig. — Cette ligne à retard n'a aucun sens!

Cur. — Comment cela?

Ig. — Elle n'a ni entrée ni sortie; on peut s'en servir dans les deux sens.

Cur. — C'est le cas de tout composant passif linéaire.



Ig. — Quant à la ligne à retard de luminance, elle doit mesurer $\frac{20 \text{ cm} \times 0{,}7\ \mu s}{64\ \mu s} = 2{,}2$ mm. Il ne doit pas y avoir beaucoup de place pour souder!

Cur. — Mais non! La ligne à retard de luminance n'est du tout du même type : c'est une ligne *électrique* à constantes réparties. Elle doit être à large bande et non pas transmettre seulement une bande étroite centrée sur la fréquence de sous-porteuse. Et vous pourrez aisément souder les cosses, car elle mesure une dizaine de centimètres.

Quant à l'inverseur électronique...

Bascule, oscillateur, limiteurs et discriminateurs.

Ig. — Je crois comprendre d'après le schéma comment il fonctionne. Lorsque la tension aux deux entrées de l'inverseur est positive, les diodes horizontales conduisent et les diodes croisées sont bloquées. Lorsqu'elle est négative, c'est le contraire. Il convient donc de superposer aux signaux d'entrée de l'inverseur des créneaux alternativement positifs et

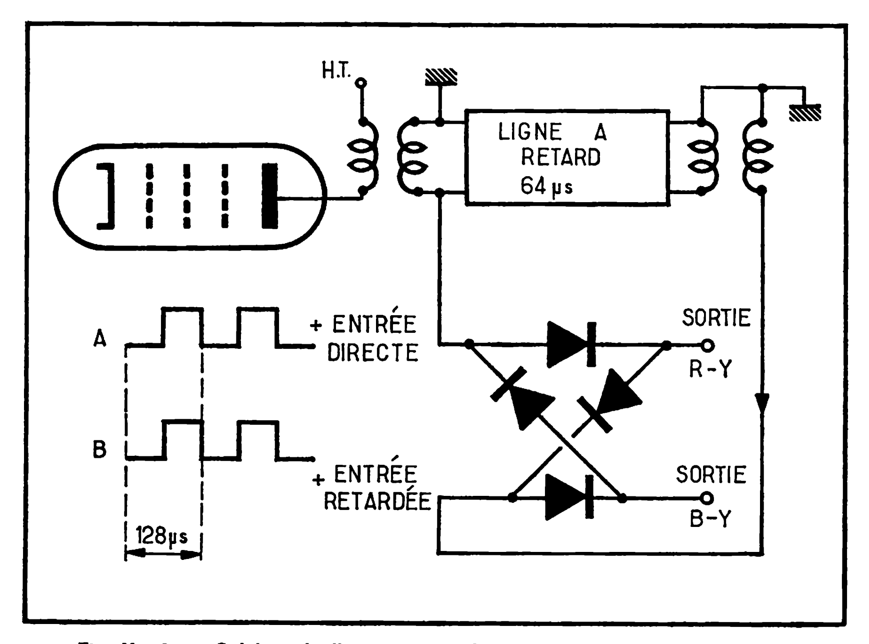


Fig. X - 6. — Schéma de l'inverseur et forme des signaux de commande

négatifs, la polarité changeant à chaque ligne. Ces créneaux pourraient être délivrés par une bascule bistable, comme un montage Ecclès-Jordan, excitée par les impulsions lignes; mais je ne vois rien de semblable.

Cur. — La bascule bistable existe sur le schéma; seulement, il n'y a qu'un tube pour la réaliser : c'est l'heptode montée en *phantastron*.

Ig. — Quelle est cette nouvelle « phantaisie »?

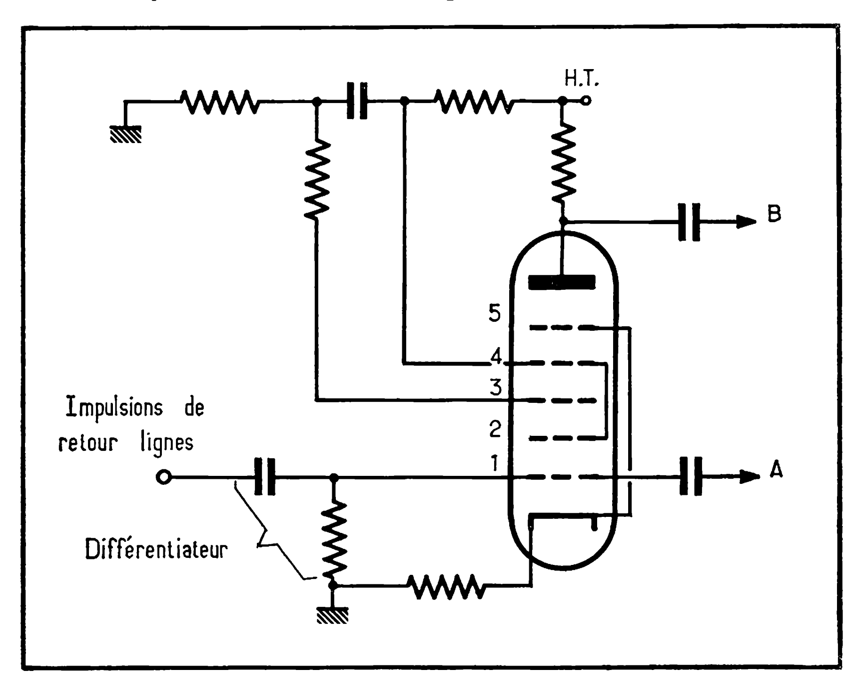
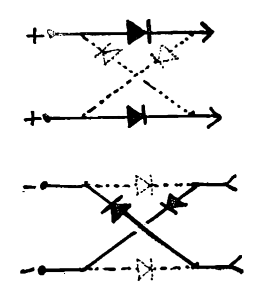


Fig. X-7. — Le phantastron est une bascule bistable.



Cur. — Ce tube est bloqué périodiquement par les impulsions lignes fortement négatives appliquées sur la grille 1; et la contre-réaction entre anode et grilles 2 et 3 constitue une bascule bistable.

Ig. — Quant à la sortie de la ligne à retard, elle est appliquée à la deuxième entrée de l'inverseur par l'intermédiaire d'un transformateur. Est-ce une question d'adaptation d'impédances?

Cur. — L'impédance de la ligne est faible et complexe (c'est-à-dire non purement résistive); elle présente une perte d'insertion de 20 dB qui est compensée par le transformateur élevateur.

Ig. — Il y a sur le schéma deux choses qui m'inquiètent.

Cur. — Dites.

Ig. — Tout d'abord, je vois deux limiteurs à diodes aux sorties de l'inverseur, ce qui fait en tout trois limiteurs. N'est-ce pas du gâchis?

Cur. — Le limiteur d'entrée de la partie chrominance du décodeur est en fait un « prélimiteur ». Après l'inverseur électronique, vous pouvez avoir encore de légères différences de niveau entre signaux retardés et non retardés. Par ailleurs, en réglant le courant qui polarise les diodes, on peut faire varier l'amplitude de la sous-porteuse à la sortie des limiteurs, de sorte que l'on a ainsi réalisé le réglage de saturation.

En effet, l'amplitude des signaux de chrominance doit varier comme l'amplitude du signal de luminance. Voilà pourquoi le réglage de contraste agit sur cette polarisation. Par ailleurs, il est prévu un ajustement du rapport luminance-chrominance à effectuer par le spécialiste à ce niveau.

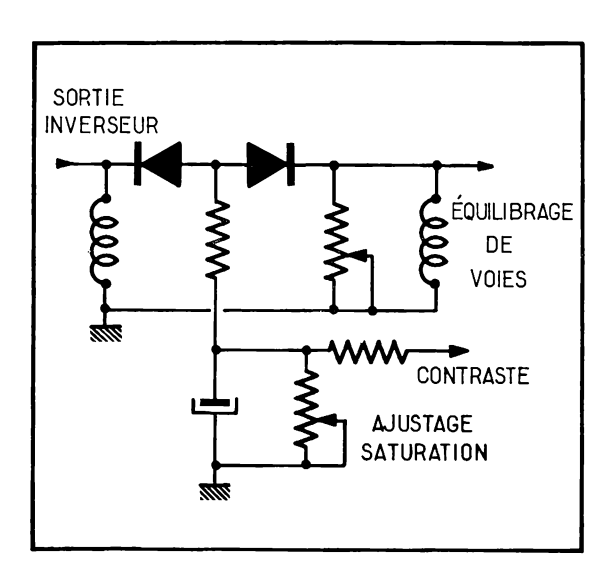
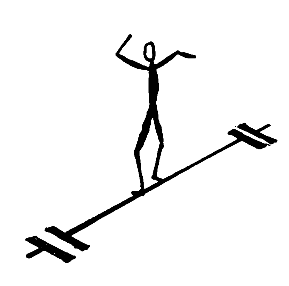


Fig. X - 8. — Schéma d'un des limiteurs à la sortie de l'inverseur.

IG. — Je reccnnais les deux discriminateurs qui sont du type « à déphasage », moins utilisé en radiodiffusion que le discriminateur « de rapport ». Néanmoins, je suis intrigué par deux points.

CUR. — Allons-y.

IG. — Il me semble que, dans le schéma classique, le point milieu est réalisé par une prise sur le secondaire.



CUR. — Et vous avez raison. Ici nous avons affaire à un discriminateur qui doit être très stable en ce qui concerne la fréquence d'accord, tout en ayant une bande passante plus large que les discriminateurs de radiodiffusion. La stabilité de la fréquence d'accord est rendue nécessaire par le fait que, comme vous pouvez le constater, la composante continue de chrominance est ensuite transmise intégralement jusqu'aux wehnelts du tube-image. Il s'est avéré que le bobinage bifilaire du tertiaire n'était pas propice à cette fin, et on préfère créer un point milieu artificiel par un pont de condensateurs, le couplage étant réalisé par l'inductance commune de la bobine L (et non pas par induction magnétique). Les éventuelles dérives en fonction de la température (variations des caractéristiques des diodes et des autres composants) sont ainsi réduites au minimum.

Dans le règne de la vidéo.

IG. — J'ai compris. Pouvez-vous maintenant m'expliquer pourquoi les diodes du discriminateur (R — Y) sont montées à l'envers de celles du discriminateur (B — Y)?

CUR. — Très simplement. Le professeur Radiol n'a-t-il pas dit que les signaux de chrominance étaient de signes opposés?

Ig. — Bien sûr. On rétablit donc de cette façon la bonne polarité. Je reconnais sur le schéma la matrice de résistances qui effectue l'opération

$$-(V-Y)=\frac{1}{2}(R-Y)+\frac{1}{6}(B-Y)$$

la triode changeant ensuite le signe — en signe +. Mais pourquoi les trois amplificateurs vidéo sont-ils construits sur des schémas différents?

Cur. — Vous faites sans doute allusion à la contre-réaction par résistance et capacité sur les amplificateurs (R — Y) et (B — Y) seulement.

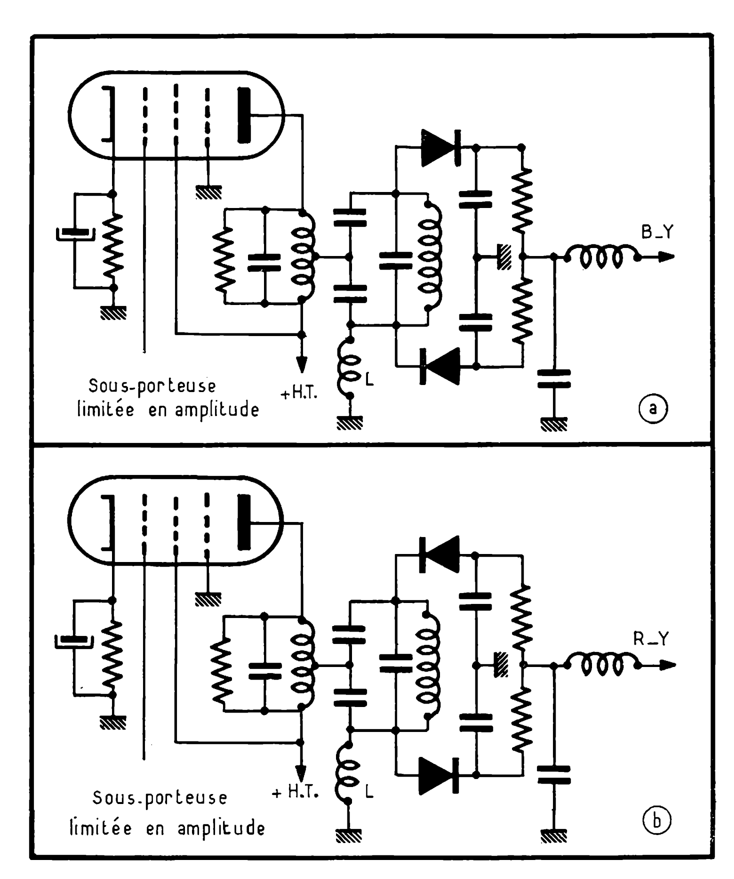


Fig. X - 9. Discriminateur (B-Y) en a et discriminateur (R-Y) en b. Ces discriminateurs sont de constitution identique (à part l'inversion des diodes) mais fonctionnent sur des fréquences de repos légèrement différentes.

Ig. — C'est cela. Pourquoi l'amplificateur (V — Y) n'a-t-il pas cette contre-réaction sélective?

Cur. — Tout simplement parce qu'il est nécessaire de désaccentuer les signaux (R — Y) et (B — Y); mais le signal (V — Y), formé à partir de (B — Y) et (R — Y) déjà désaccentués, n'en a pas besoin.

Ig. — Il manque quelque chose sur ce schéma.

Cur. — Vous voulez parler de la synchronisation et du blocage couleur; mais patience, nous y arrivons.

Ig. — Pas du tout. Il manque la matrice, entre le signal Y et les signaux de chrominance, qui permet de retrouver les signaux primaires que l'on applique aux wehnelts.

Cur. — Cette matrice n'est pas nécessaire. Le signal Y est appliqué aux trois cathodes, et les signaux de chrominance aux trois wehnelts

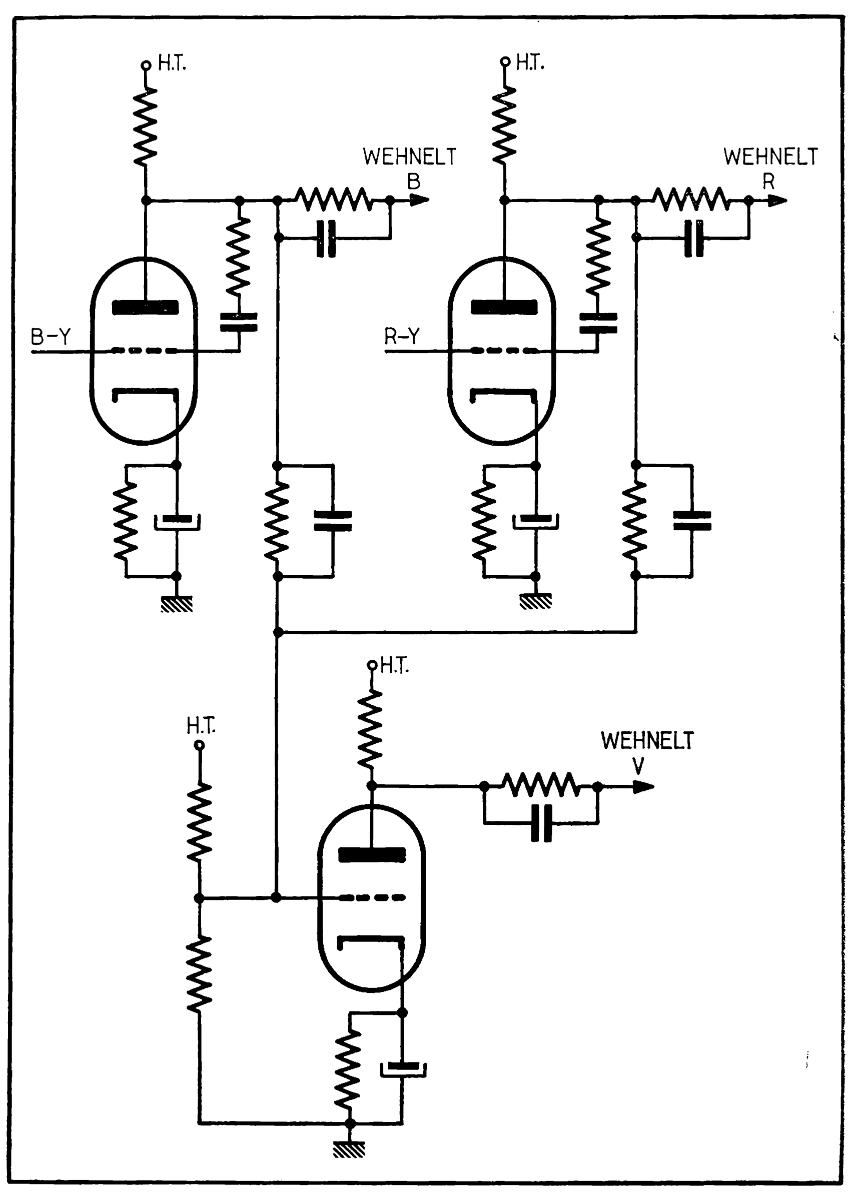


Fig. X-10. — Matrice de résistances permettant d'obtenir le signal différentiel de vert à partir de ceux de rouge et de bleu.

correspondants du tube-image. Les faisceaux électroniques sont donc modulés par la différence entre les signaux de chrominance et le signal de luminance, c'est-à-dire par les trois signaux primaires.

Ig. — C'est une histoire de fous! Pour économiser trois résistances, vous utilisez quatre tubes au lieu de trois

Cur. — Faites bien attention. Si vous voulez amplifier les signaux primaires, il vous faut trois amplificateurs de 5 MHz de bande passante. Si vous opérez comme nous le faisons, il faut un seul amplificateur de 5 MHz (pour le signal Y) et trois amplificateurs de 1,5 MHz (pour les signaux de chrominance). Faites le calcul et vous verrez que nous sommes gagnants.

Ig. — Je n'avais pas envisagé cet aspect « bande passante » de la question. Pour avoir fait le tour du décodeur, il ne nous reste plus que

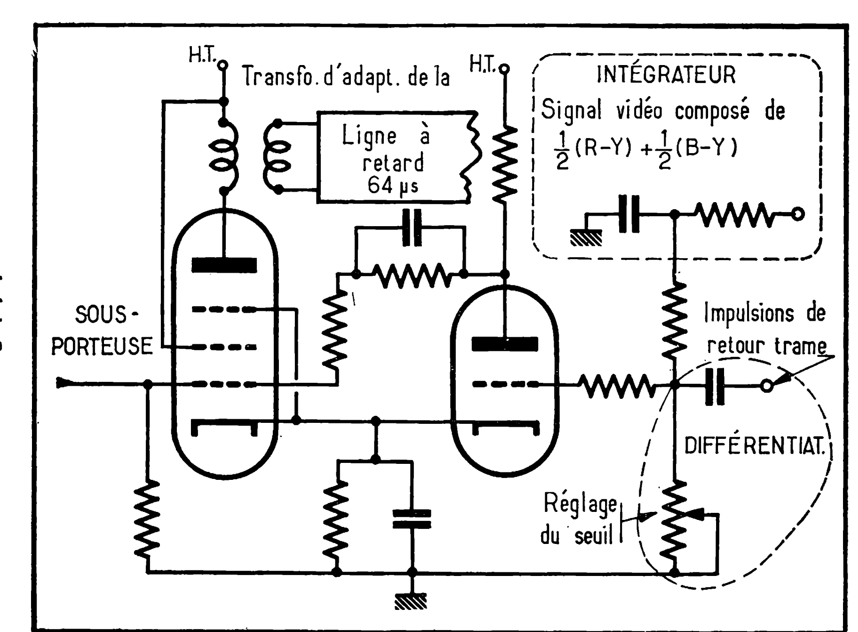


Fig. X-11. — Synchronisation et blocage de la couleur par bascule de Schmitt.

la synchronisation et le blocage de la couleur. Je me souviens bien du principe exposé par le Professeur Radiol; mais comment réalise-t-on cette fonction?

Pour tuer la couleur.

Cur. — Oubliez un instant le rôle d'amplificateur de sous-porteuse de la pentode de la figure X-4 et dites-moi comment ce tube est monté avec la triode dans le schéma de la figure X-11.

Ig. — Les deux cathodes sont réunies. Une portion de la tension anode de la triode est ramenée sur la grille de la pentode. C'est un genre de bascule.

PROGRAMME MONOCHROME
Impulsion de retour trame différentiée.

PROGRAMME EN COULEURS
Impulsion de retour trame differentiée.
Signaux d'identification de bonne phase intégrée.

Impulsion de retour trame differentiée.
Signaux d'identification de mauvaise phase intégrée.

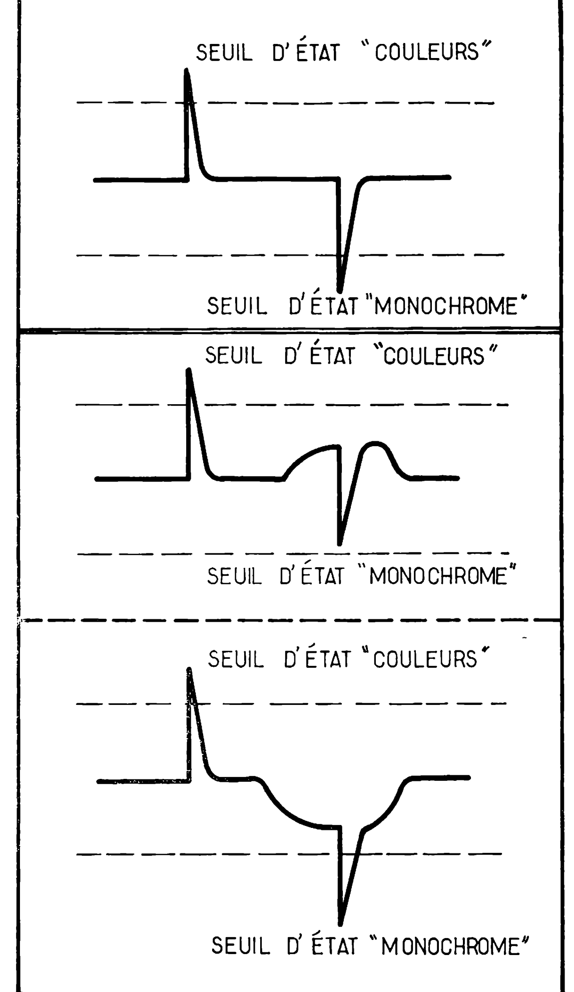
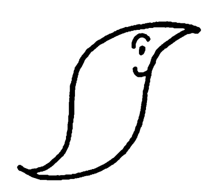


Fig. X - 12. — Fonctonnement de la bascule de Schmitt.

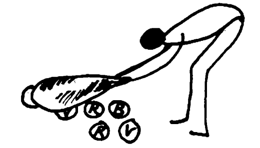
CUR. — C'est un bistable à couplage cathodique, en effet. On l'appelle *bascule de Schmitt.* La bascule de Schmitt jouit de la propriété suivante : lorsque la tension de commande appliquée à une des grilles reste inférieure à une tension de *seuil* donnée, la bascule reste dans un état stable, c'est-à-dire qu'un des tubes conduit tandis que l'autre est bloqué; si la tension de commande dépasse le seuil, la bascule passe dans son autre état stable, c'est-à-dire que le tube précédemment bloqué se met à conduire et inversement; lorsque la tension de commande redescend, la bascule reprend son premier état stable, mais pour une valeur de seuil inférieure : on dit qu'il y a *hystérésis*.



Le signal appliqué sur la grille de la triode se compose des impulsions de retour images différentiées, ajoutées au signal de synchronisation couleur, c'est-à-dire la somme intégrée des lignes d'identification détectées. Le flanc avant de l'impulsion de retour trames differentiée est très positif et met la bascule de Schmitt dans l'état stable où la pentode conduit; le flanc arrière est très négatif et la met dans l'état stable où la pentode est bloquée, état où toute la partie chrominance du décodeur est bloquée, puisque cette pentode est le premier étage chrominance. Donc, en l'absence de lignes d'identification (programme monochrome),

Fig. X-13. — Version transistorisée du schéma de la figure X-10.

la partie chrominance du décodeur se bloque automatiquement. On a ainsi réalisé ce qui est désigné dans la littérature anglo-saxonne sous le nom de « *colour killer* » (tueur de couleur).



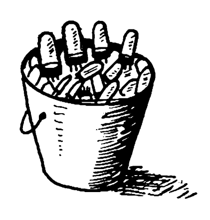
Ig. — Et ce blocage est nécessaire car, en l'absence de sous-porteuse, les limiteurs, chargés de délivrer une puissance constante, amplifieraient le bruit de fond, n'est-ce pas?

CUR. — Exactement. Maintenant, vous allez voir que ce circuit de blocage va pouvoir servir à *remettre au pas* l'inverseur du décodeur s'il marche à l'envers par rapport à celui du codeur.

Lorsque tout va bien, le signal de synchronisation couleur superposé au flanc arrière de l'impulsion de retour trames différentiée est très positif et « soulève » cette impulsion négative. Elle ne peut dès lors mettre la bascule dans l'état « couleur bloquée ».

Par contre, si l'inverseur fonctionne à l'envers, il y a interversion entre (R — Y) et (B — Y), et le signal de synchronisation couleur est négatif. Le canal chrominance est bloqué comme dans le cas d'un programme monochrome, et le phantastron reçoit une impulsion de commande supplémentaire (au moment où la bascule de Schmitt se bloque) qui le remet au pas.

IG. — Et, par conséquent, à la trame suivante, lorsque le flanc avant de l'impulsion de retour remet la pentode en service, l'inverseur fonctionne avec la bonne phase et tout est pour le mieux dans le meilleur des téléviseurs couleurs... Mais, dites-moi, toute cette technique me semble bien rétrograde.



Du solide au lieu du vide.

CUR. — Que voulez-vous dire? Il me semble à moi, au contraire, que la couleur marque un grand progrès.

IG. — Certes. Mais avouez qu'à notre époque, un téléviseur nouveau, réalisé entièrement avec des tubes, cela ne fait pas très moderne.

CUR. — Notez bien que les schémas que je vous ai montrés ne sont que des exemples de réalisation possible. A partir du moment où vous avez compris comment sont réalisées les différentes fonctions du décodeur avec des tubes, vous saurez comment on fait un décodeur à transistors.

IG. — En remplaçant chaque tube par un transistor?

CUR. — Et en recalculant les circuits en fonction des nouvelles tensions et impédances mises en jeu, ce peut être une première étape. Mais l'esprit de la réalisation peut être influencé par l'utilisation de transistors.

IG. — Comment cela?

CUR. — Eh bien, votre remarque de tout à l'heure concernant les quatre amplificateurs vidéo se trouve maintenant justifiée, car les transistors vidéo usuels, qui passent aisément 6 MHz, ne sont guère plus coûteux que les transistors ne passant que 1,5 MHz. On préférera alors une matrice à résistances pour élaborer les signaux primaires et trois amplificateurs vidéo. Compte tenu des éventuelles dérives des caractéristiques des semiconducteurs en fonction de la température, il sera sans doute préférable de ne pas transmettre la composante continue et de pratiquer sur le dernier étage une *restitution*. Mais sachez que la transistorisation complète d'un téléviseur couleurs est, à l'heure actuelle, assez ardue, tout au moins pour les modèles à grand écran.

IG. — Pourquoi cela?

CUR. — A cause des circuits de balayage lignes, en particulier, qui exigent une puissance beaucoup plus grande que dans les téléviseurs monochromes. De même, le débit de THT important demande une régulation qui ne peut se faire qu'avec un tube de puissance.

IG. — Mais pourquoi diable voulez-vous réguler la THT?

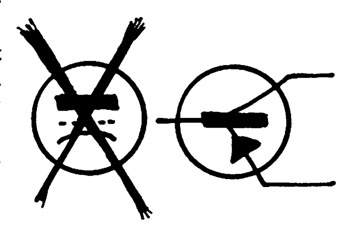
CUR. — Vous avez bien compris que les trajectoires électroniques

du tube à masque d'ombre doivent être très stables de façon que les électrons ne se trompent pas de luminophore.

IG. — Et si la THT varie en fonction du débit des cathodes (c'est-à-dire en fonction du contenu de l'image), on risque d'avoir des erreurs de pureté.

CUR. — Voilà!

IG. — Autrement dit, la télévision en couleurs se caractérise quand même par un pas en arrière en ce qui concerne la technique des composants.



CUR. — Oui et non. Les transistors progressent de jour en jour, et tout ce que je vous ai dit ne s'applique qu'au tube à masque d'ombre. Une nouvelle technique de tube-image a déjà permis de transistoriser l'ensemble du téléviseur.

IG. — Cela me fait plaisir. Car le transistor, qui est beaucoup plus petit que le tube à vide, a une vie infiniment plus longue!



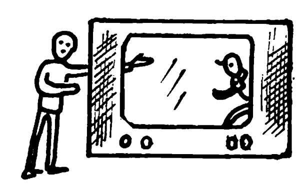
CHAPITRE XI

Grâce aux connaissances acquises au cours des chapitres qui précèdent, nos deux jeunes amis peuvent aborder la dissection d'un récepteur d'images en couleurs. Ils le feront en passant successivement en revue les éléments suivants :

Amplificateur de fréquence intermédiaire. — Lignes à retard. — Régénération de la porteuse. — Démodulateurs synchrones. — Amplificateurs vidéo. — Suppression de la couleur. — Transistorisation. — C.A.G. de saturation.

ANALYSE D'UN RECEPTEUR PAL

Cela commence avec la FI.



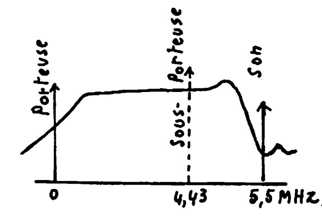
IGNOTUS. — Mon cher ami, la conférence du professeur Radiol m'a profondément intéressé. Mais il manquait, à mon avis, quelque chose.

CURIOSUS. — Je crois deviner, mais achevez votre pensée.

IG. — Eh bien, j'ai appris beaucoup de choses théoriques sur les différents systèmes de télévision compatibles et sur leurs propriétés et j'aurais aimé maintenant que nous entrions un peu plus dans la « chair » du téléviseur qui nous intéresse le plus, c'est-à-dire du récepteur PAL.

CUR. — Notez bien que la conférence d'hier était une conférence d'information destinée à un public très large et que le professeur Radiol ne pouvait pas entrer dans les détails.

IG. — Bien sûr; mais en fait, si on met le tube-image de côté, il n'y a que la partie vidéo qui distingue un téléviseur polychrome d'un appareil classique.



CUR. — Vous avez à la fois tort et raison.

IG. — ???

CUR. — En théorie, bien sûr, jusqu'à la détection, rien ne distingue les deux récepteurs. Et pourtant, le constructeur a quelques précautions à prendre pour l'amplificateur FI, par exemple.

IG. — Expliquez-vous.

CUR. — Volontiers. En télévision monochrome, l'allure de la courbe de réponse FI aux hautes fréquences n'est pas très critique; l'important est que la porteuse son soit bien « réjectée » comme on dit. Mais en couleur, cette zone du spectre est précisément celle où est située la sous-porteuse; la courbe de réponse de l'amplificateur FI ne doit donc pas

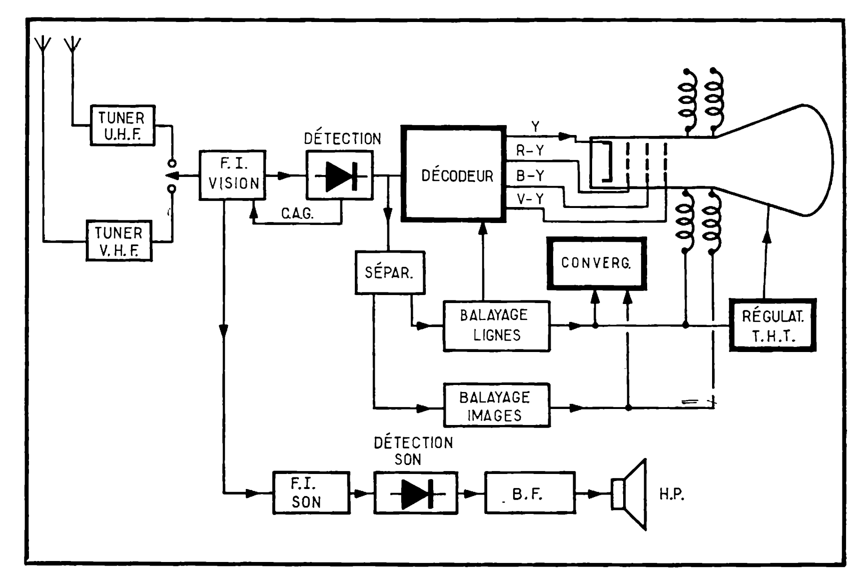


Fig. XI-1. — Composition synoptique d'un récepteur PAL. Les éléments qui ne font pas partie d'un téléviseur monochrome et qui, par conséquent, sont particuliers à la couleur, sont représentés en trait plus gras.

tomber trop brutalement; il est souhaitable que le gain reste constant dans toute la bande chrominance.

Ig. — Je devine que cet amplificateur FI sera plus difficile à réaliser.

Cur. — En effet, car la courbe de réponse connaît forcément une descente rapide au voisinage de 5,5 MHz, position de la porteuse son. On risque donc de voir la bande latérale supérieure de chrominance en être affectée. Nous avons vu déjà (chapitre IX) que le principe PAL

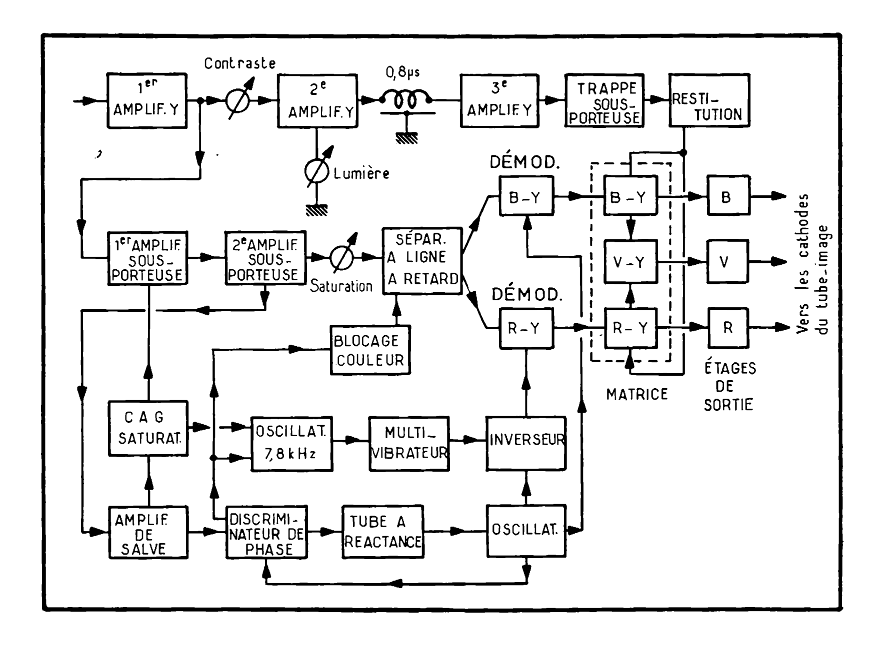


Fig. XI-2. — Schéma synoptique du décodeur PAL.

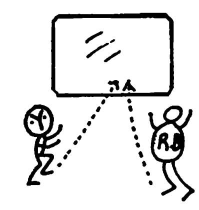
supprime l'erreur de quadrature qui pourrait en résulter. Mais, évidemment, au détriment de la saturation. Ainsi, dans le cas d'une dérive du tuner, on assistera à des *variations de la saturation,* ce qui est moins grave que l'apparition d'une *diaphotie chromatique* comme en NTSC.

IG. — Mais alors il suffit de prévoir une commande automatique de gain — une C.A.G. comme on dit — supplémentaire, spécialement pour la sous-porteuse et qui soit basée sur l'amplitude de la salve, par exemple.

Décodeur = Luminance + Chrominance.

CUR. — Venons-en au décodeur, si vous le voulez bien, et nous n'évoquerons, bien entendu, que le cas du PAL-Standard.

IG. — J'ai compris quelles étaient ses fonctions. Pouvez-vous m'expliquer comment on les réalise?



CUR. — Ce problème — étant donnée une fonction, comment la réaliser avec des circuits — est du ressort de la radio-électricité générale. Nous allons analyser, si vous le voulez bien, pas à pas le schéma d'un décodeur. Il se compose très grossièrement de deux parties : la partie luminance et la partie chrominance.

IG. — C'est bien évident, et nous pouvons laisser la partie luminance de côté, puisque c'est un amplificateur vidéo des plus classiques.

CUR. — Vous vous trompez, mon cher ami; il n'est pas classique du tout, car il a des fonctions nouvelles à accomplir : en particulier, il doit retarder l'information de luminance d'à peu près 0,7 µs de façon que, sur l'écran du téléviseur, elle arrive en même temps que l'information de chrominance, transmise à bande étroite.

IG. — Pardon, mais c'est le *codeur,* à l'émission, qui accomplit ce retard et non le décodeur du récepteur.

CUR. — Vous ne vous trompez pas : le codeur, lui aussi, comprend une ligne à retard dans le canal luminance. Et les informations de luminance et de chrominance sont en phase à l'issue dudit codeur. Cela ne dispense cependant pas de la nécessité d'une ligne à retard pour le signal de luminance dans le décodeur du récepteur.

IG. — Mais n'aurait-on pas pu mettre dans le codeur une ligne à retard deux fois plus longue, afin d'économiser celle du récepteur?

CUR. — Cette idée est tellement évidente, mon cher ami, qu'on y a bien pensé avant vous.

IG. — Et comme d'habitude, l'expérience prouve qu'elle est totalement idiote.

CUR. — Ne vous fâchez donc pas, Ignotus, puisque je vous dis que des personnalités éminentes du monde technique ont eu cette idée.

IG. — Allons-y, démolissez-la maintenant.

CUR. — Cette méthode serait parfaitement valable si la sous-porteuse n'était pas modulée en amplitude. Mais un transitoire chromatique s'accompagne souvent (presque toujours) d'un transitoire de luminance. Si vous retardez la luminance de 0,7 µs, tout se passera bien dans le téléviseur polychrome, mais n'oublions pas le malheureux possesseur d'un téléviseur monochrome. Que verra-t-il?

IG. — Je comprends. Dans l'image compatible, le signal de chrominance arrive en même temps que le signal de luminance (puisqu'il n'y

a pas de décodeur). Et la luminance « préretardée » au codage est décalée vers la droite de l'image d'à peu près $\frac{0,7\ \mu s}{64\ \mu s}$.40 cm soit environ 4 mm pour un écran de 40 cm de côté horizontal.

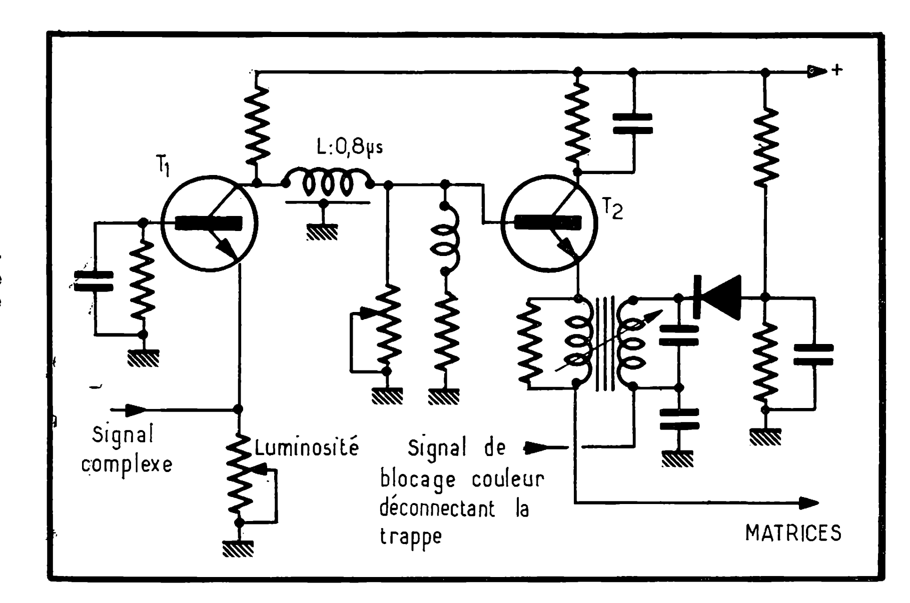


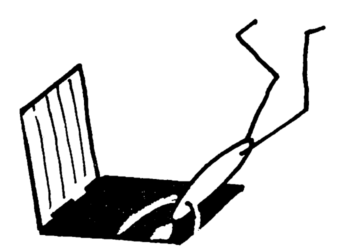
Fig. XI-3. — Amplificateur du signal de luminance dans le système PAL.

CUR. — Si l'amplitude de la sous-porteuse n'était pas modulée, cela n'aurait aucune importance, encore une fois. Mais on verra très nettement deux transitoires séparés de 4 mm sur l'image noir et blanc.

IG. — Un peu comme un écho.

CUR. — Ou, plus exactement, le contraire d'un écho, car l'image principale (luminance) se trouve à droite de l'image fantôme (sous-porteuse). Mais l'amplificateur de luminance a encore une autre fonction à accomplir. Il doit absorber la sous-porteuse, car sa présence perturberait l'image en couleurs.

Dans les méandres de la luminance.



IG. — Le professeur Radiol y a fait allusion, mais j'ai mal compris. On dit, en effet, que le système est compatible, c'est-à-dire que la visibilité de la sous-porteuse est négligeable.

CUR. — C'est vrai pour les récepteurs monochromes dans lesquels l'amplificateur FI présente un certain affaiblissement à la fréquence de sous-porteuse. Dans le récepteur couleurs, cet amplificateur présente une courbe de réponse plate dans la bande chromatique. Comme il est de toute façon de conception spéciale, il ne coûte rien de rendre l'image parfaite en prévoyant une *trappe* de sous-porteuse.

IG. — Donc l'amplificateur de luminance est un amplificateur vidéo auquel on a ajouté une ligne à retard de 0,7 µs et un circuit-bouchon, « piège » de sous-porteuse.

Cur. — C'est presque ça. Regardons le schéma. Le signal détecté complexe subit, après filtrage de la porteuse son et l'indispensable séparation d'impédance par émettodyne, une préamplification par le transistor T_1. Après passage dans la ligne à retard L, le signal est débarrassé de la sous-porteuse par le circuit accordé, placé en couplage dans l'émetteur du transistor T_2.

Notez que cette trappe n'est mise en service que lorsqu'il y a de la sous-porteuse. Dans le cas d'un programme monochrome, elle est déconnectée, et le canal de luminance jouit de toute sa définition. La commutation se fait, bien entendu, automatiquement.

Le signal Y est appliqué ensuite aux matrices pour l'élaboration des signaux R, V et B.

Ig. — Bon, et que devient la sous-porteuse dans tout cela?

Cur. — Elle a été prélevée au niveau de l'émettodyne qui précède le premier amplificateur luminance et elle est appliquée à la partie chrominance du décodeur.

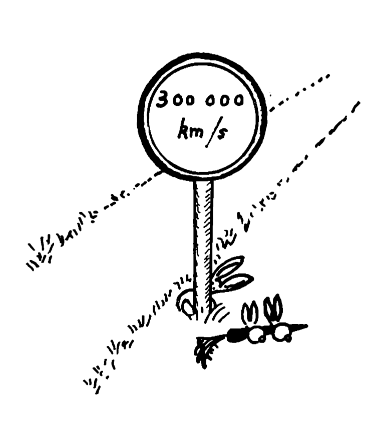
Ig. — Celle-ci doit être bougrement compliquée...

Anatomie et physiologie des lignes à retard.

Cur. — On peut distinguer les fonctions suivantes : amplification de la sous-porteuse, prélèvement de la salve, séparation des signaux de chrominance à l'aide de la ligne à retard de 64 µs, régénération de la sous-porteuse, démodulation synchrone, matrices d'élaboration des signaux primaires, étages de sortie, circuits de synchronisation et de blocage couleur. Voyons-les l'une après l'autre.

Les circuits associés aux transistors T_1 et T_2 permettent un filtrage soigné de la sous-porteuse. A la sortie du filtre, la salve est prélevée, amplifiée, et sa phase est détectée. Ce signal servira à la synchronisation et au blocage couleur. Un potentiomètre de *saturation* permet d'appliquer au circuit de séparation comportant une ligne à retard, une partie plus ou moins grande de la sous-porteuse.

Après amplification par le transistor T_3, la sous-porteuse est appliquée, par l'intermédiaire d'un transformateur adaptateur d'impédances, à la ligne à retard de 64 µs.



Ig. — Comment peut-on réaliser une telle ligne à retard? Si je me souviens bien, le produit de la bande passante par le retard à obtenir détermine le nombre d'éléments inductance-capacité de la ligne qui doit être énorme.

Cur. — Vous avez raison, parce que vous croyez qu'elle est réalisée à partir de tels éléments. En fait, on utilise une technique très différente. Les ondes électromagnétiques sont difficiles à retarder parce qu'elles vont très vite.

Ig. — On ne saurait aller plus vite en effet, puisqu'elles se propagent à la vitesse de la lumière : 300 000 km/s.

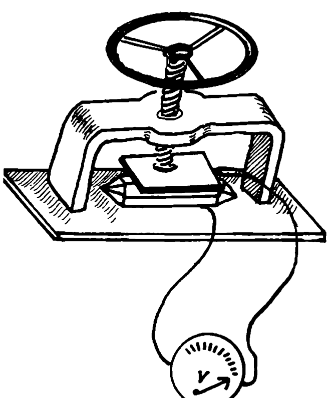
Cur. — Dans le vide. Dans un système à retard, on les ralentit. Mais on peut travailler avec des ondes encore beaucoup plus lentes, qui se propagent par exemple à la vitesse de quelques kilomètres par seconde seulement.

Ig. — Oh là là! Cela fait une sérieuse différence. Comment fait-on?

Cur. — Ne connaissez-vous pas des ondes lentes, Ignotus?

Ig. — Certes, les ondes sonores, par exemple...

Cur. — Justement; ou pour être plus général, les ondes mécaniques. Or, il existe des substances, dites piézo-électriques, qui se déforment mécaniquement lorsqu'on les excite électriquement.



Ig. — Vous faites allusion aux membranes de haut-parleurs?

Cur. — Elles répondent à la définition, mais ce ne sont pas des substances, ce sont des objets fabriqués. Je pensais au quartz et à une série de céramiques comme certains titanates polarisés. Réciproquement, d'ailleurs, excitées mécaniquement, ces substances deviennent des générateurs électriques.

Ig. — J'aurais dû y penser. C'est même pour cette raison que l'on fait des oscillateurs à quartz, car les systèmes mécaniques cristallins ont beaucoup moins de pertes que les systèmes électriques; on peut donc obtenir de très grandes surtensions.

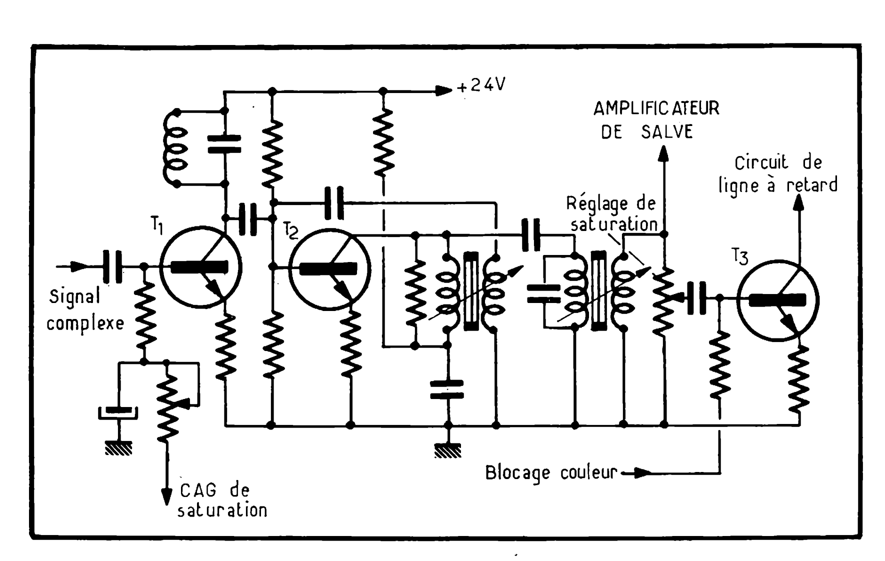


Fig. XI-4. — Composition de l'amplificateur de sous-porteuse.

Cur. — Ici, nous ne recherchons par la surtension pour elle-même, et on n'utilise la substance piézo-électrique que pour transformer l'onde électrique en onde mécanique. A la fréquence de la sous-porteuse, il s'agit d'un ultra-son parfaitement inaudible; on le fait se propager dans un barreau de verre d'une vingtaine de centimètres à l'extrémité duquel on a fixé une pastille piézo-électrique absolument identique à la première.

Ig. — Et comment peut-on fixer du quartz sur du verre?

Cur. — On utilise plutôt le titanate de baryum que le quartz et on le colle sur les extrémités du barreau convenablement rectifiées. Notez que la composition du verre est étudiée pour que, lorsque la température augmente, la vitesse de propagation augmente elle aussi, ce qui vient compenser l'augmentation de trajet due à la dilatation. Ainsi le retard reste constant.

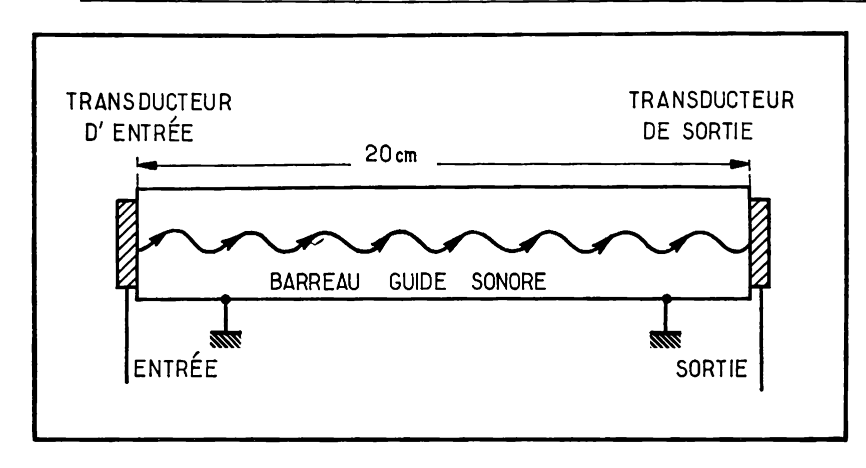


Fig. XI-5. — Anatomie d'une ligne à retard.

Ig. — De sorte que la ligne à retard est un barreau de verre de 20 cm de long aux deux extrémités duquel sont fixées des pastilles de titanate de plomb.

Cur. — Et la longueur de 20 cm correspond à un trajet de 64 µs de l'onde ultra-sonore. Dans le vide, avec une onde électromagnétique, le trajet correspondant au même retard aurait été de 20 km.

Ig. — Cette ligne à retard n'a aucun sens!

Cur. — Comment cela?

Ig. — Elle n'a ni entrée ni sortie; on peut s'en servir dans les deux sens.

Cur. — C'est le cas de tout composant linéaire.

Ig. — Quant à la ligne à retard de luminance, elle doit mesurer

$$\frac{20 \text{ cm} \times 0{,}7 \ \mu\text{s}}{64 \ \mu\text{s}} = 2{,}2 \text{ mm}$$

Il ne doit pas y avoir beaucoup de place pour souder!

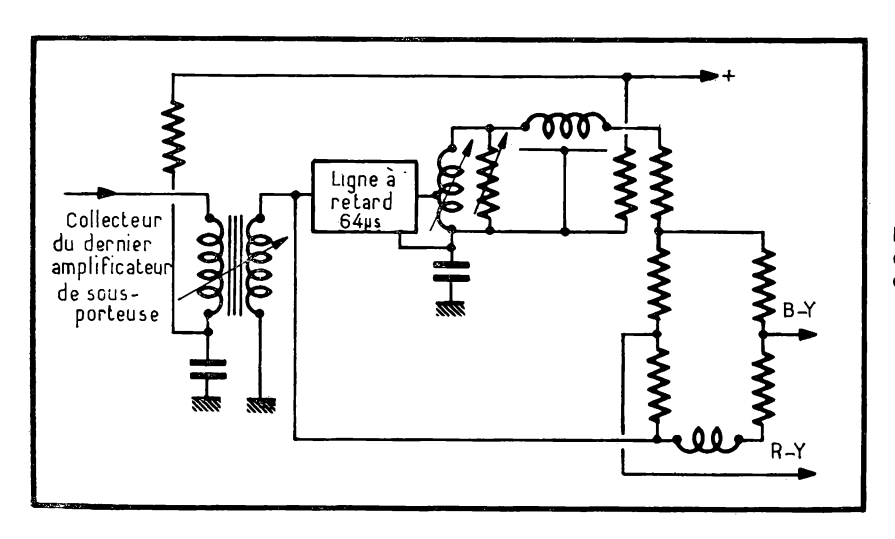


Fig. XI-6. — Circuits de séparation des deux sous-porteuses.

Démodulation.



Cur. — Mais non! La ligne à retard de luminance n'est pas du tout du même type : c'est une ligne *électrique* à constantes réparties. Elle doit être à large bande et non pas transmettre seulement une bande étroite centrée sur la fréquence de sous-porteuse. Et vous pourrez aisément souder les cosses, car elle mesure une dizaine de centimètres.

Ig. — Et que fait-on du signal de chrominance retardé?

Cur. — La phase et l'amplitude du signal de sortie de la ligne à retard sont ajustées afin de correspondre rigoureusement à celles du signal d'entrée. Les signaux H.F. (R — Y) et (B — Y) sont obtenus par addition des sous-porteuses à l'entrée et à la sortie de la ligne à retard, le déphasage convenable pour (B — Y) étant obtenu à l'aide d'une inductance variable.

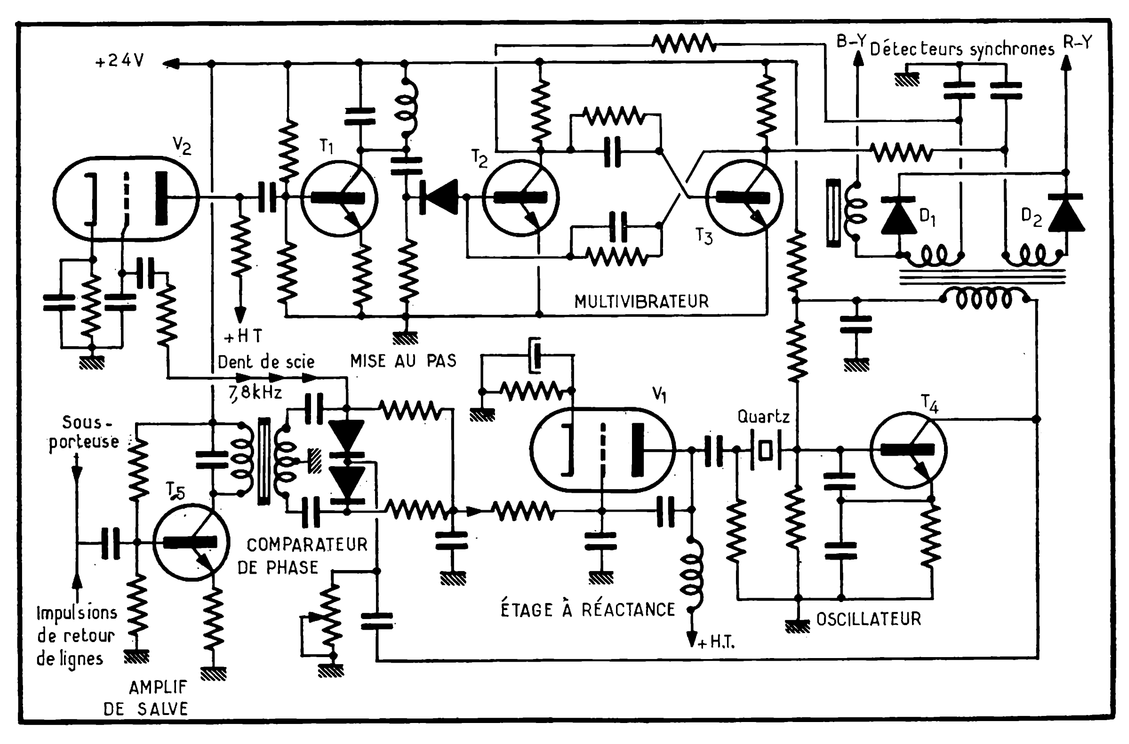
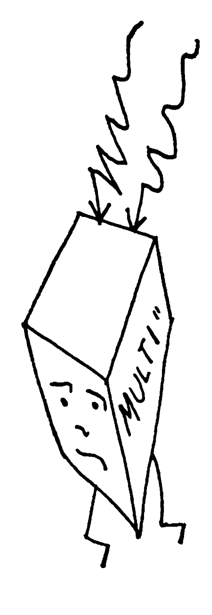


Fig. XI-7. — Méthode de régénération de la sous-porteuse dans le système PAL.

La modulation d'amplitude par (R — Y) et (B — Y) se faisant avec suppression de la porteuse, la détection sera une *détection synchrone* exigeant la reconstitution d'une porteuse. A cet effet, un oscillateur T_4 à quartz est commandé par un étage à réactance V_1 (la fréquence moyenne étant imposée par le quartz Q) ; la phase de l'oscillateur est comparée à celle de la salve par un comparateur de phase dont le signal d'erreur est appliqué au tube à réactance.



L'oscillation de référence ainsi régulée en phase est appliquée avec des phases différant de 90° aux détecteurs (R — Y) et (B — Y).

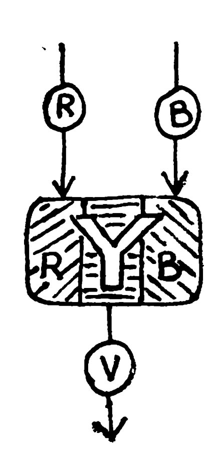
Il est encore nécessaire d'inverser la polarité de cette oscillation de référence à chaque ligne pour le détecteur (R — Y) dont la polarité — c'est le principe même du PAL à l'émission — change à chaque ligne.

A cet effet, un multivibrateur bistable, composé des transistors T_2 et T_3, vient bloquer successivement les diodes D_1 et D_2, délivrant ainsi une polarité ou l'autre. Ce multivibrateur est déclenché par les impulsions de retour lignes, et sa « mise au pas » est assurée à partir des salves alternées détectées (synchronisation couleurs). Recevant la sous-porteuse de référence ainsi obtenue comme « signal fort », les démodulateurs synchrones sont attaqués, en « signal faible », par la sous-porteuse modulée par (R — Y) et (B — Y). Un équilibre entre les deux voies est prévu à ce niveau.

Dans le règne de la vidéo.

IG. — Et comment retrouve-t-on le signal « vert »?

CUR. — Les signaux (R — Y) et (B — Y) détectés et dûment filtrés, sont appliqués à la *matrice*. Celle-ci est composée de trois transistors T_R, T_V, T_B. Chacun reçoit, sur son émetteur, le signal Y au travers de résistances dont les valeurs sont choisies pour retrouver des niveaux égaux en sortie; sur les bases de T_R et T_B sont appliqués les signaux de chrominance détectés, et sur la base de T_V le signal (V — Y) obtenu dans une matrice de résistances à partir des émetteurs de T_B et T_R.



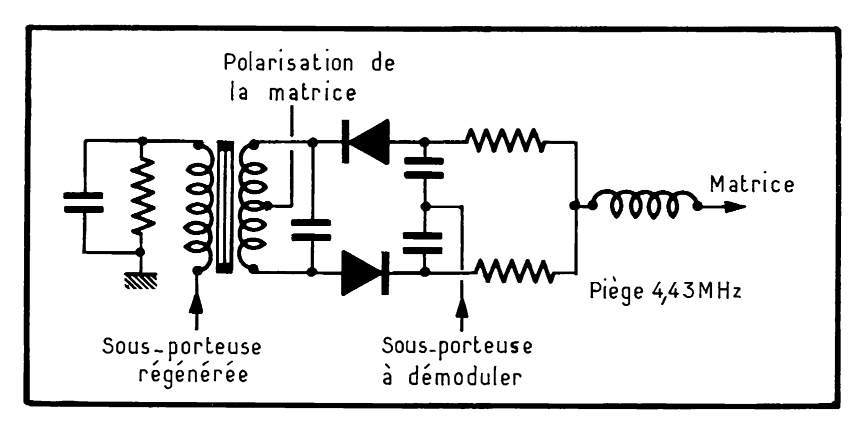


Fig. XI-8. — Schéma du démodulateur synchrone.

IG. — Bien sûr. Je reconnais sur le schéma la matrice de résistances qui effectue l'opération

$$-(V - Y) = \frac{1}{2}(R - Y) + \frac{1}{6}(B - Y)$$

Mais je trouve que vous exagérez, mon cher Curiosus, lorsque vous prétendez que la TV en couleurs, c'est presque simple.

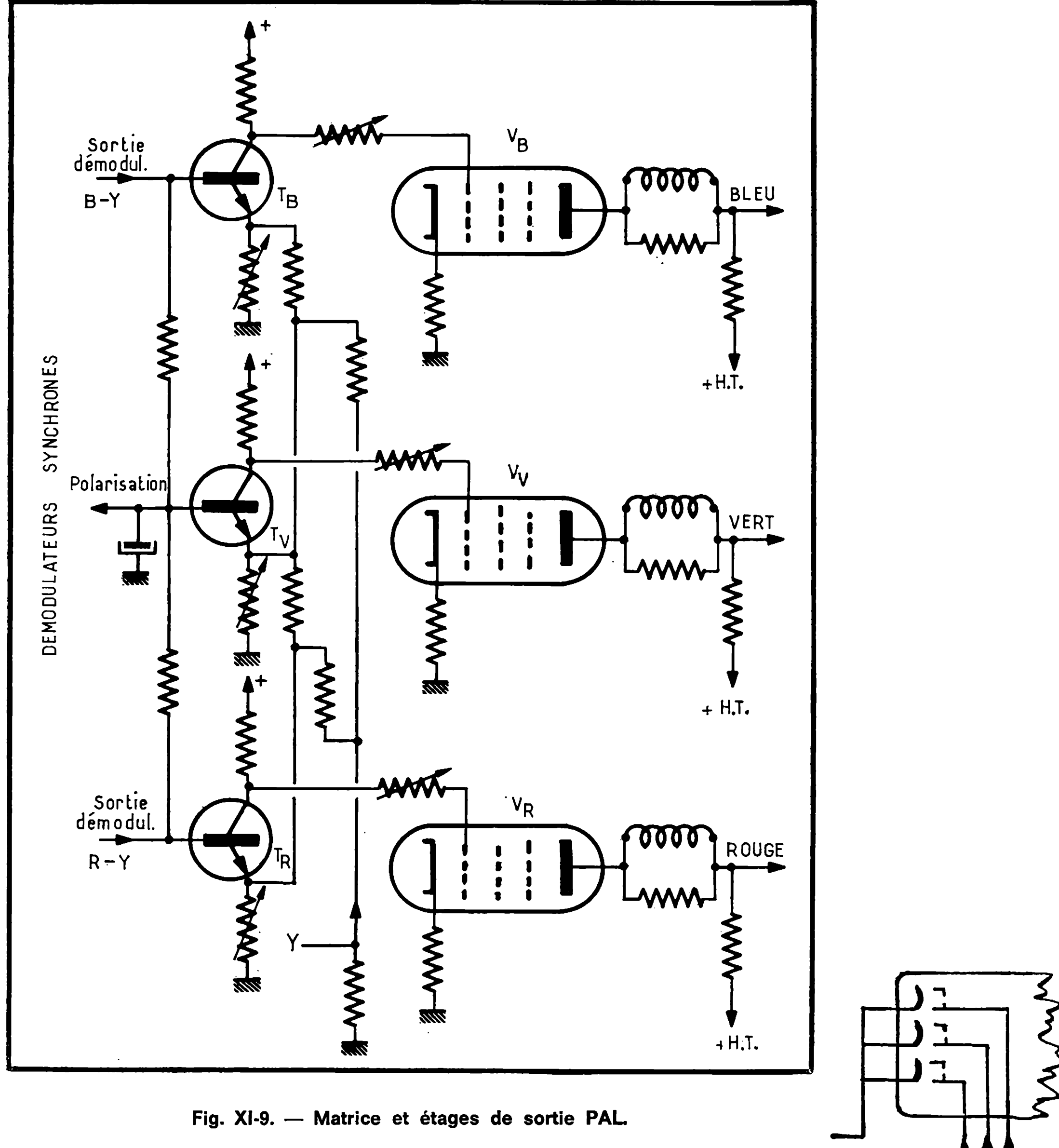


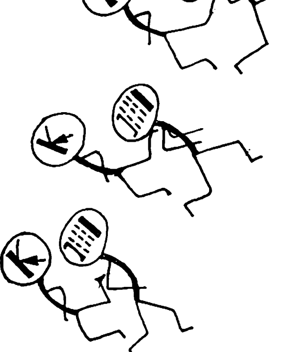
Fig. XI-9. — Matrice et étages de sortie PAL.

Cur. — Allons donc! Vous vous familiariserez vite avec ces circuits nouveaux pour vous. D'ailleurs, nous n'avons pas terminé.

Ig. — Oh, mon Dieu!

Cur. — Parlons un peu des amplificateurs de sortie.

Ig. — Enfin! Qui dit « circuits de sortie » annonce la fin prochaine de mes malheurs!



CUR. — Détrompez-vous, Ignotus. Il me faudra encore vous entretenir du blocage couleur et de la commande automatique de saturation. Mais... patience.

Les circuits de sortie sont composés essentiellement des trois pentodes V_R, V_V et V_B que vous voyez immédiatement après les trois transistors T_R, T_V et T_B. Et, comme vous pouvez le constater, la transmission des signaux depuis les détecteurs synchrones jusqu'aux trois cathodes du tube-image se fait en courant continu.

IG. — C'est ce que j'appelle « chercher les ennuis ». Pourquoi ne pratique-t-on pas une *restitution* de la composante continue comme dans tous les téléviseurs?

CUR. — On ne peut la pratiquer que sur le signal Y qui porte les impulsions de synchronisation. Pour les signaux de chrominance, il faudrait un coûteux dispositif de « clamping », et il est préférable de transmettre intégralement la composante continue.

IG. — Vous allez donc m'expliquer maintenant votre histoire de « blocage couleur » à laquelle je ne comprends rien.

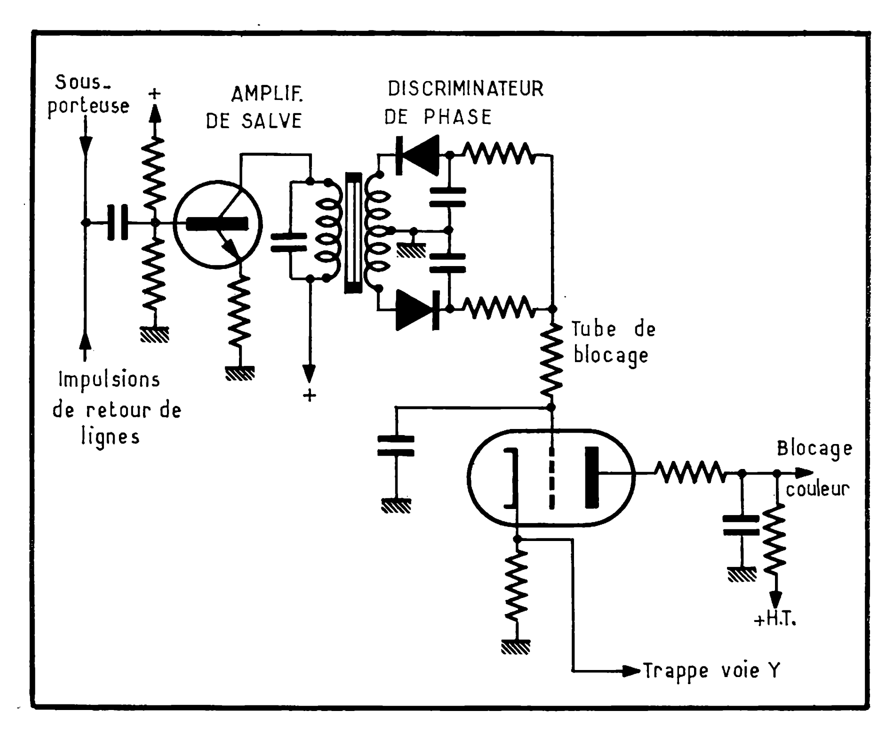


Fig. XI-10. — Circuit de blocage de la couleur PAL.

CUR. — C'est pourtant simple : en l'absence de sous-porteuse (c'est-à-dire lorsque le programme est monochrome), il faut déconnecter, pour ainsi dire, le décodeur et la trappe de sous-porteuse dans la luminance.

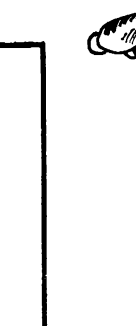
IG. — Soit pour la trappe puisque je bénéficierai ainsi d'une meilleure définition, mais pourquoi le décodeur?

Tuer la couleur ou la fortifier ?

CUR. — Parce qu'il peut passer au travers du décodeur des parasites, du bruit et même des composantes de luminance, celles qui se trouvent précisément dans la bande chromatique.

IG. — Alors que fait-on?

CUR. — On utilise une fois de plus la salve alternée détectée. Si elle est absente (programme monochrome), la triode, qui est normalement bloquée, s'ouvre et sa tension d'anode bloque le troisième transistor amplificateur de sous-porteuse. Cette même tension déconnecte la trappe du schéma XI-3 par la diode. Dans la littérature anglo-saxonne, le circuit s'appelle « colour killer » ou *tueur de couleur.*



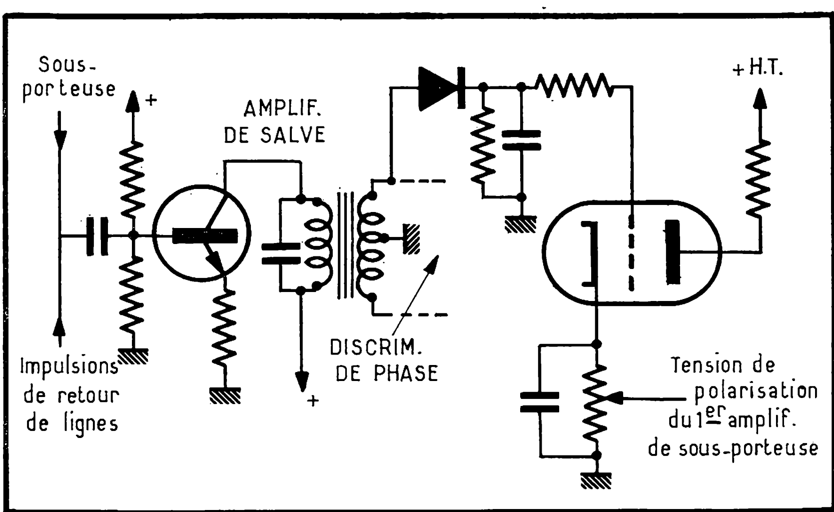
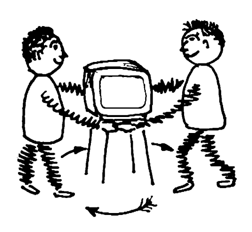


Fig. XI-11. — Commande automatique du gain de saturation dans le système PAL.

IG. — Vous aviez encore évoqué une C.A.G. pour la saturation. Comment la réalise-t-on?

CUR. — Une fois de plus, on va faire appel à la salve alternante.



IG. — Cette salve alternante est vraiment la bonne à tout faire du système PAL!

CUR. — Disons en tout cas que ses facultés sont exploitées au maximum. Ainsi l'amplitude de la salve est détectée par un redresseur et appliquée à la grille d'une triode; la cathode de cette dernière est reliée à la base du premier amplificateur de sous-porteuse dont le gain augmente lorsque cette tension diminue et *vice-versa.*

IG. — Nous avons donc fait pratiquement le tour du récepteur.

CUR. — En fait, non; nous avons regardé en détail le décodeur dont l'étude théorique est fondamentale pour la compréhension du fonctionnement. Mais nous avons laissé de côté tout ce qui est balayage et alimentations.

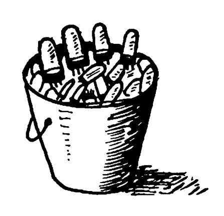
IG. — Pour qui me prenez-vous? Je connais tout cela par cœur depuis que je fais du noir-et-blanc!

CUR. — Pas tout à fait, mon ami. Vous apprendrez, à vos dépens, par la pratique, que les circuits pour la couleur sont plus complexes et plus puissants.

IG. — Mais, dites-moi, il y a dans tout cela quelque chose qui me gêne.

Du solide au lieu du vide.

CUR. — Dites voir.



IG. — Avouez qu'à notre époque, un téléviseur nouveau, réalisé avec des tubes, cela ne fait pas très moderne.

CUR. — Notez bien que les schémas que je vous ai montrés ne sont que des exemples de réalisation possible. S'ils comportent des tubes et des transistors, c'est sans doute parce que naguère il n'était pas possible de faire autrement. Mais de nos jours existe le téléviseur entièrement transistorisé, tout au moins pour les grands écrans (angle de déflexion 110°) et pour les portables.



CHAPITRE XII

La composition complexe d'un téléviseur polychrome requiert tout naturellement un certain nombre de réglages spécifiques. Curiosus s'efforcera de démontrer à son jeune ami qu'en procédant avec méthode et en possession d'un générateur de signaux adéquat, on règle l'appareil en une vingtaine de minutes. Il sera donc traité ici de réglages qui sont communs à tous les récepteurs, aussi bien ceux du SECAM que ceux du PAL, à savoir :

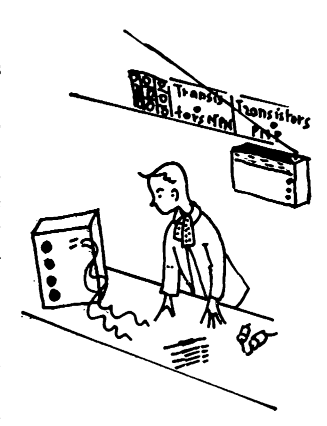
Réglage de la pureté. — Convergence statique. — Convergence dynamique. — Teinte de fond.

INSTALLATION ET MISE AU POINT DES TÉLÉVISEURS

Ignotus craint des complications.

CURIOSUS. — Bonjour, Ignotus, c'est gentil chez vous!

IGNOTUS. — Bonjour, Curiosus. C'est la première fois que vous pénétrez dans mon antre?



CUR. — Eh oui! Je suis heureux de voir qu'après nos entretiens sur la radio et la télévision vous êtes devenu des nôtres.

IG. — Mon cher ami, vous m'avez insufflé la passion de l'électronique, et je me suis établi radioélectricien surtout pour le plaisir de bricoler. Je vends et répare postes de radio et de télévision; mais à dire vrai, je bricole de moins en moins, car tout cela ne tombe pas souvent en panne.

CUR. — Progrès de la technique, mon cher ami...

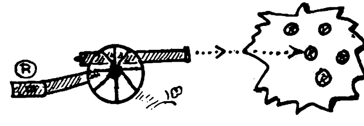
IG. — De sorte que j'occupe mes loisirs à m'instruire. Mais, dites-moi, j'ai l'impression que les récepteurs de télévision en couleurs sont bougrement plus compliqués que les téléviseurs classiques. Et j'ai peur d'avoir bientôt du pain sur la planche, car il me semble qu'il y ait un grand nombre de réglages très délicats à faire.

CUR. — N'exagérons rien! Les réglages en télévision en couleurs sont certes plus nombreux et plus délicats qu'en TV monochrome, mais il n'est pas nécessaire d'être grand clerc pour en venir à bout. Un bon radioélectricien qui connaît son métier se convertira très vite à cette technique nouvelle. D'autant plus qu'il existe des mires spécialement étudiées pour la couleur et que, comme vous le savez, un téléviseur couleurs est essentiellement composé d'un récepteur noir et blanc dont on a remplacé partie vidéo et tube-image par quelque chose de nouveau. Donc tout ce qui concerne les antennes, « tuners », amplificateurs FI, détecteurs, chaînes son vous est déjà familier. Ce qui risque de vous troubler le plus, c'est le tube-image avec ses circuits associés.

A la recherche de la pureté.

IG. — Pouvez-vous me donner des indications sur le réglage de la *pureté* par exemple?

CUR. — Rien de plus simple. Il faut vous assurer que *les électrons issus d'un canon donné* (nous prendrons en exemple le Rouge, parce que c'est sur cette couleur que les erreurs de teinte se voient le mieux) *ne rencontrent que les luminophores adéquats.* Nous allons donc mettre hors service les deux autres canons. (Les récepteurs sont généralement munis d'interrupteurs prévus à cet effet; sinon vous y parviendrez en réglant par exemple les tensions des wehnelts très bas.) Pour bien observer le phénomène, il ne doit pas y avoir d'image, c'est-à-dire que le signal appliqué au récepteur ne doit contenir que les signaux de synchronisation, ce qui est facile à faire avec votre mire de réglage de téléviseurs noir et blanc. Que voyez-vous alors?



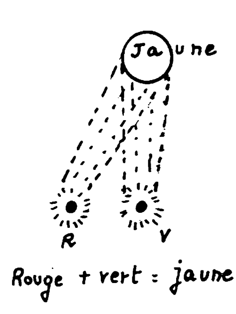
IG. — Rien du tout!

CUR. — Bien! Et si vous réglez la tension wehnelt du canon Rouge au-dessus de sa valeur normale?

IG. — On voit alors l'écran uniformément rouge.

CUR. — Souhaitons-le, car dans ce cas il est parfaitement pur. Mais si vous voyez dans un coin une tache jaune, qu'est-ce que cela signifie?

IG. — Si je me souviens bien du triangle de Maxwell et des expériences du Palais de la Découverte, le jaune est obtenu par un mélange de rouge et de vert.



CUR. — Exact! Et, par conséquent, cela signifie que des électrons issus du canon Rouge percutent également des luminophores verts.

IG. — Mais alors que faire?

CUR. — Tout d'abord, soigneusement démagnétiser le téléviseur avec une bobine d'inductance alimentée en courant alternatif. Assurez-vous alors que le tube est *pur* en son centre, c'est-à-dire que le spot au centre de l'écran est bien sur une pastille à luminescence rouge.

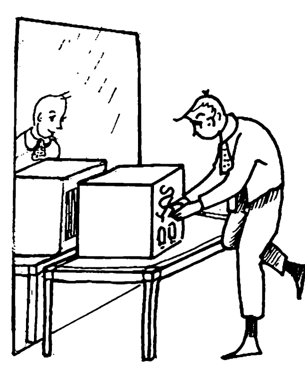
IG. — Et s'il ne l'est pas?

CUR. — Cela peut se produire et signifie que l'ensemble de déflexion n'est pas à sa place. Il a pu bouger pendant le transport.

IG. — Et alors il suffit de le recaler. J'ai bien compris, mais il faut être deux pour cela.

CUR. — Et pourquoi donc? Ce n'est pas très pénible que je sache!

IG. — Mais comment saurais-je que j'ai atteint la bonne position des bobines si je ne peux voir sur l'écran la tache rouge centrale? Il faut donc être deux, un devant, l'autre derrière le poste.



CUR. — Si vous pouvez vous payer un aide, je n'y vois aucun inconvénient; sinon, je suggère l'utilisation d'un miroir.

IG. — C'est l'évidence même, suis-je bête! Donc voici mon écran parfaitement pur et un réglage très simple à faire.

CUR. — Holà! Comme vous allez vite... Votre écran est parfaitement pur au centre, mais vous pouvez avoir des taches sur les bords.

IG. — C'est gai! Va-t-il falloir tordre les bobines?

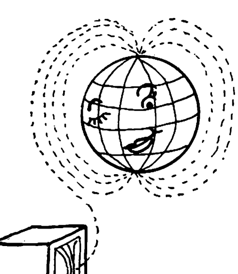
CUR. — Je ne vous le conseille pas. D'autant plus que les tubes sont munis d'une *bague de pureté,* petit aimant qu'il suffit de tourner jusqu'à ce que l'écran soit uniformément rouge, sans taches. Il s'agit en fait de deux anneaux aimantés; en les faisant tourner l'un par rapport à

l'autre, on fait varier l'intensité du champ magnétique et, en les faisant tourner ensemble, sa direction.

Ig. — Bon, j'ai compris. Je règle la pureté au centre de l'écran, la pureté sur la périphérie et je mets mon récepteur au magasin en attendant de le livrer.

Cur. — Ne faites surtout pas cela, ne réglez pas vos récepteurs avant de les mettre en stock!

Ig. — Vous voulez que je fasse ma petite cuisine sous l'œil narquois du client?



Cur. — Pourquoi pas? Il vous en sera reconnaissant par la suite, car, voyez-vous, un tube-image de télévision en couleurs est aussi sensible qu'une boussole : si vous le réglez pour une valeur et une orientation données du champ magnétique terrestre, votre réglage n'est plus valable si vous tournez quelque peu le téléviseur.

Ig. — De quoi perdre la boussole!... Je crois que je vais vendre ma boutique.



Il y a convergence et convergence.

Cur. — Pas de crise de désespoir, Ignotus : en vingt minutes passées chez votre client, vous aurez réglé tout ce qui est spécial et nouveau, tout ce qui est « couleur » dans votre téléviseur. Je vous ai accordé cinq minutes pour la pureté; je vous en donne maintenant cinq autres pour la *convergence.*

Ig. — C'est-à-dire pour la superposition géométrique exacte des trois images primaires. Comment fait-on cela?

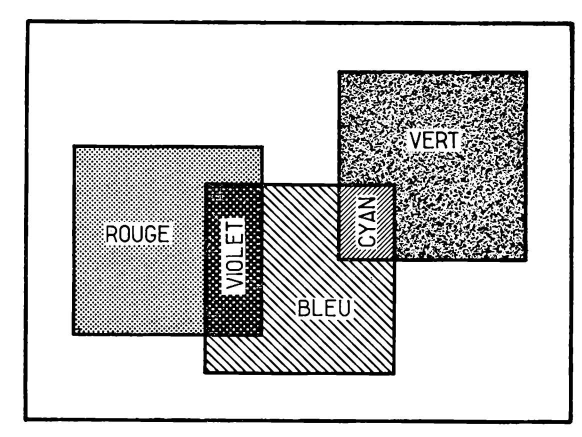
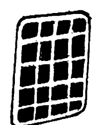
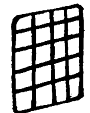


Fig. XII-1. — Défaut de convergence statique visible sur un point qui devrait être blanc au milieu de l'écran. On voit, en fait, trois points se chevauchant plus ou moins.

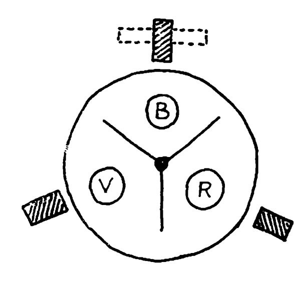


Cur. — On alimente le téléviseur avec une mire de carreaux ou, mieux encore, de points carrés (blancs sur fond noir). On examine l'intersection de deux barres blanches (ou bien le point blanc) au centre de l'écran. On doit avoir un petit carré blanc; mais, dans le cas général où la convergence n'est pas réglée, on voit trois carrés (rouge, vert, bleu) qui peuvent se chevaucher partiellement.



Ig. — On voit quelquefois le même phénomène dans des revues en couleurs mal imprimées.

Cur. — Seulement, l'éditeur ne munit pas la revue d'un jeu d'aimants pour rectifier le tir.



Ig. — Et que fait-on de ces aimants?

Cur. — Ils sont disposés autour du col du tube, entre les canons à électrons et l'ensemble de déflexion.

Ig. — Donc re-miroir!

Cur. — Comme vous dites! Vous avez quatre aimants :

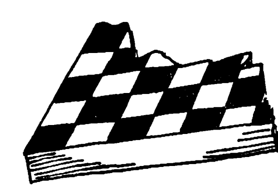
— le premier fait progresser le carré Rouge à 60°;

— le second agit sur le carré Vert selon une trajectoire inverse (donc également à 60°) ;

— le troisième fait monter ou descendre le carré Bleu;

— le quatrième et dernier fait se déplacer le même carré Bleu horizontalement de gauche à droite.

Ig. — En somme c'est tout aussi compliqué que les échecs. Et vous savez bien que je sais tout juste jouer aux dames.



Cur. — Pas d'affolement, Ignotus. En agissant d'abord sur les deux premiers aimants et en coupant le canon Bleu, vous pouvez me faire un petit carré jaune bien net, sans frange ni rouge ni verte. Vous réallumerez alors le canon Bleu et vous agirez sur les deux derniers aimants pour placer le carré bleu sur le carré jaune, c'est-à-dire pour faire un carré blanc sans franges.

Ig. — Et voilà la convergence réglée!

Cur. — Vous avez oublié un mot.

Ig. — Vous faites des exercices de style à présent?

Cur. — Non, de la télévision, et en couleurs... Vous auriez dû dire : voilà réglée la convergence *statique*. Car rien ne prouve que de ce petit

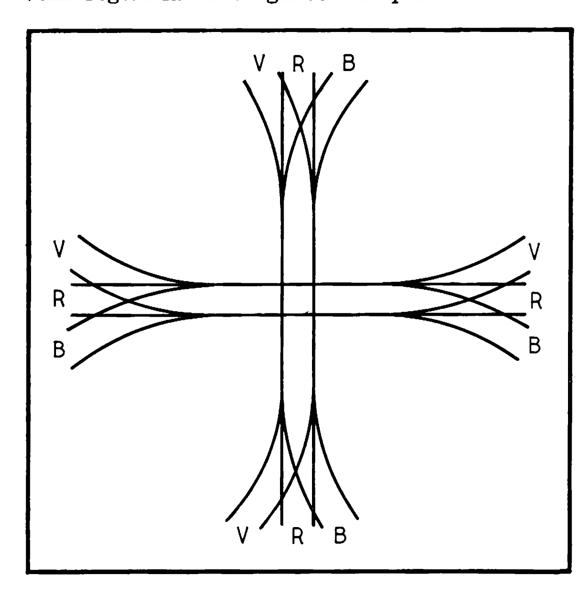


Fig. XII-2. — Défaut de convergence dynamique visible sur les bords de l'écran. An centre, la convergence est bien réglée.

carré blanc ne partent des barres rouge, verte et bleue divergentes vers la périphérie du tube.

Ig. — De sorte qu'il y a de plus un réglage de convergence...

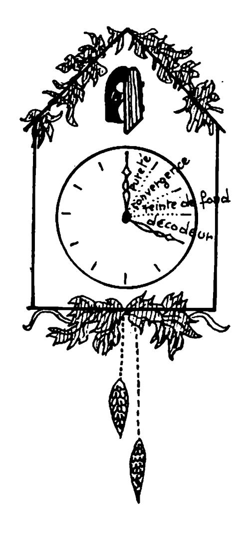
Cur. — ... *dynamique*, mais oui.

Ig. — Je crois que je vais vraiment vendre ma boutique!

Cur. — Ce n'est pas le moment, croyez-moi. D'autant plus que le réglage de convergence dynamique n'est pas très compliqué non plus

et que, comme il s'effectue en dosant le courant dans des petites bobines qui corrigent les trajectoires électroniques, les réglages se font à l'aide de potentiomètres accessibles de l'avant du poste, mais au technicien seulement. Vous pouvez donc abandonner votre miroir et suivre aveuglément le mode d'emploi donné par le constructeur du téléviseur.

Cinq minutes pour la teinte de fond.



IG. — Vous m'avez accordé vingt minutes pour le réglage du téléviseur. Il y en a déjà dix d'écoulées; il m'en reste dix.

CUR. — Bien calculé, Ignotus, mais bien sûr, avant d'entamer ces réglages, vous aviez opéré comme pour un appareil noir et blanc : ajustage des fréquences de balayage, cadrage et linéarité. Je dis bien *avant,* car ces réglages réagissent les uns sur les autres. Des dix minutes qui nous restent, nous allons en prélever cinq pour régler la *teinte de fond.*

IG. — Halte-là, je ne comprends plus rien. J'ai lu partout qu'avec les procédés modernes de télévision en couleurs, SECAM et PAL par exemple, il n'y avait pas lieu de régler la teinte.

CUR. — Vous avez raison, mais une fois de plus, vous avez oublié un mot. J'ai dit « régler la *teinte de fond* ».

IG. — J'en avais même oublié deux; quelle est cette nuance?

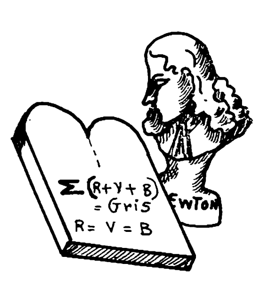
CUR. — Vous avez, dans le tube-image, trois canons à électrons. Or vous êtes bien d'accord que, lorsqu'il n'y a pas de signal vidéo appliqué, le tube doit être parfaitement noir, ce qui veut dire que le courant électronique s'annule pour les trois canons à la fois.

IG. — Cela me semble parfaitement clair, bien qu'il s'agisse de « noir ».

CUR. — De même, si les trois canons sont alimentés par le même signal vidéo, c'est-à-dire si $R = V = B$, l'écran doit apparaître d'un gris parfaitement neutre, voire blanc si la valeur commune des trois signaux vidéo est la valeur maximale.

IG. — C'est la Loi de NEWTON, n'est-ce pas, qui dit que la combinaison des trois primaires en doses égales donne du gris neutre.

CUR. — Si vous voulez, mais c'est surtout parce que les trois primaires ont été choisies à cette fin. Pour notre tube, cela signifie que les caractéristiques courant-lumière des trois canons doivent être identiques en tous points, ce qui assure toute l'échelle des gris sans dominante.



IG. — Et comment s'en rendre compte?

CUR. — Très simplement. En supprimant tout d'abord le balayage trame, afin d'avoir une trace horizontale très brillante au centre de l'écran, vous ajusterez les tensions des grilles-écrans (G_2) de manière à atteindre le point de la caractéristique juste à l'extinction des canons. Puis, en rétablissant le balayage trame, vous ajusterez les tensions de wehnelts pour que le blanc soit tout à fait pur, sans dominante de couleur. Cette opération peut être simplifiée si votre mire délivre un signal en dents de scie synchronisé à la fréquence lignes ou images. Vous pourrez alors voir lequel des trois canons « monte » plus ou moins vite que les deux autres et rectifier son débit.

Il existe un générateur spécial pour le service des téléviseurs couleurs — le « *servochrom* » — qui délivre, entre autres, une mire de carreaux et une échelle de gris en escalier.

IG. — Néanmoins, jusqu'ici, je peux opérer les réglages de pureté, de convergence et de teinte de fond avec le matériel de mesure dont je dispose.

CHAPITRE XIII

Ici nos deux amis examinent les réglages qui sont particuliers aux téléviseurs SECAM et que l'on doit effectuer après avoir réglé la pureté, la convergence et la teinte de fond. Il s'agit essentiellement des réglages du décodeur :

Mire de barres. — Accord du discriminateur. — Filtre en cloche. — Un générateur universel. — Est-ce presque simple?...

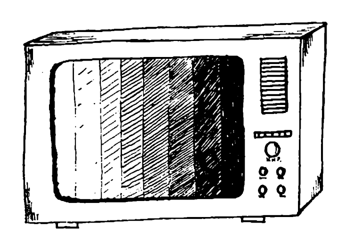
RÉGLAGE D'UN TÉLÉVISEUR SECAM

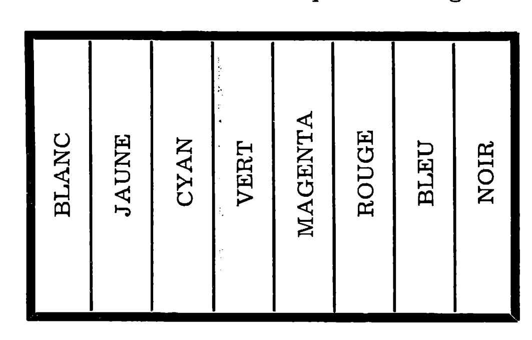
Du côté du codeur.

CURIOSUS. — Vous pouvez effectuer les réglages du tube-image en recevant la mire émise par le Centre National de Télédiffusion. Mais, comme vous le verrez par la suite, votre travail sera simplifié si vous faites l'emplette d'un générateur de service comme le « servochrom », dont je vous expliquerai le fonctionnement, ou d'une mire de barres de couleurs comme celle qui est émise par le C.N.T.

IGNOTUS. — En quoi consiste cette mire?

CUR. — En huit barres verticales qui sont de gauche à droite :





Vous remarquerez que les couleurs sont classées par ordre de luminance décroissante. Elles sont toutes saturées à 100 % (sauf le blanc et le noir, bien entendu) et on les obtient à partir de signaux vidéo simples pour les primaires. L'amplitude de ces primaires peut être de 75 % ou 30 % du niveau nominal (c'est-à-dire que le blanc est en fait un gris à 75 % ou à 30 %, quoique quelquefois le blanc soit calé à 100 % et

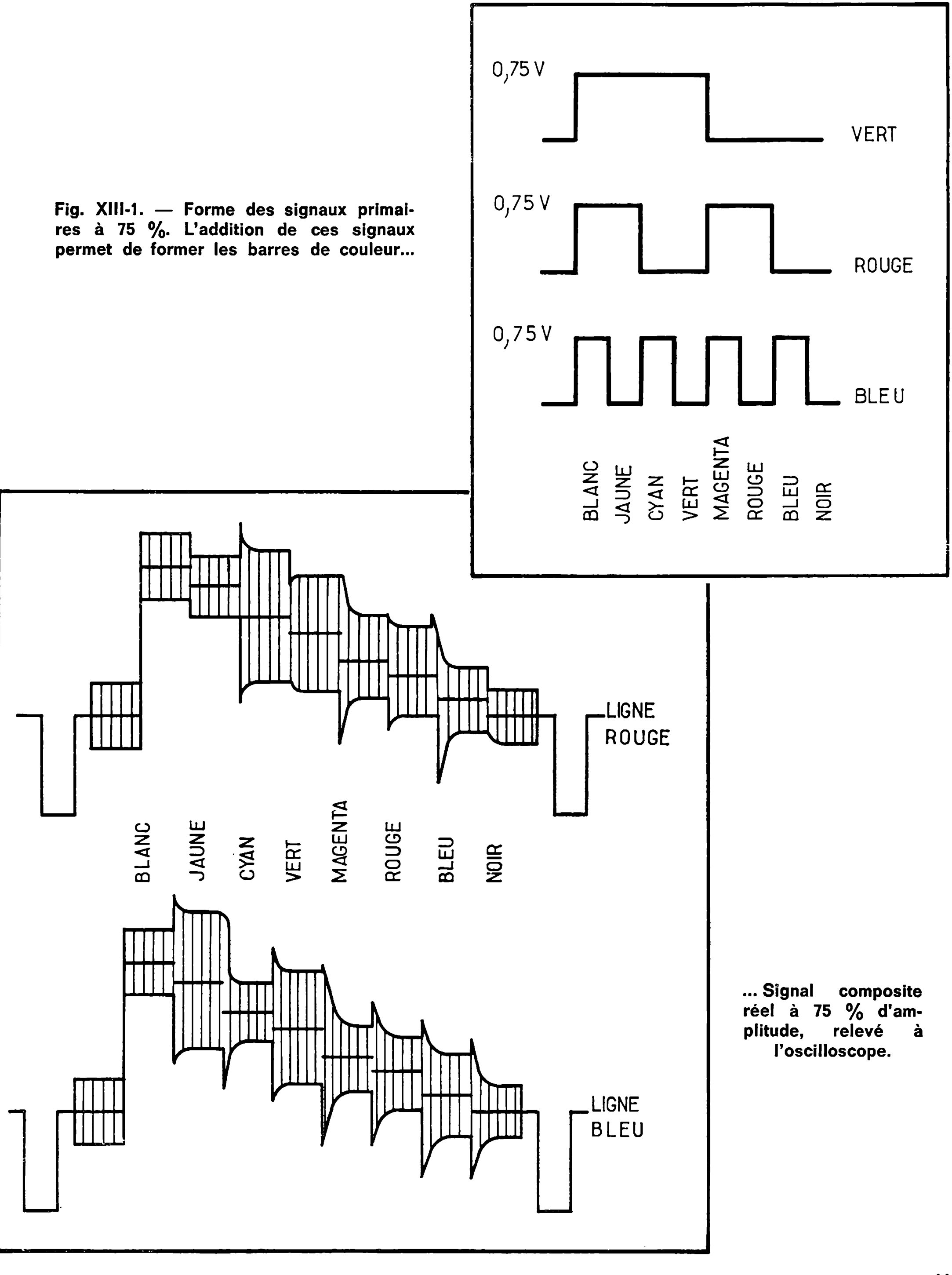
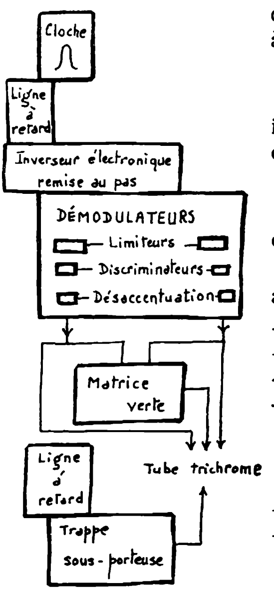


Fig. XIII-1. — Forme des signaux primaires à 75 %. L'addition de ces signaux permet de former les barres de couleur...

... Signal composite réel à 75 % d'amplitude, relevé à l'oscilloscope.



que l'amplitude des sept autres barres seulement soit réglée à 75 % ou à 30 %).

IG. — Et en quoi ces barres sont-elles utiles?

CUR. — Maintenant qu'en un quart d'heure vous avez réglé le tube-image, il vous reste cinq minutes pour contrôler le bon fonctionnement du décodeur.

IG. — Alors, dépêchons-nous!

CUR. — Ce ne sera pas nécessaire. Vous rappelez-vous les éléments essentiels du décodeur?

IG. — Je vais essayer de ne pas en oublier. D'amont en aval nous avons :

— La cloche;
— La ligne à retard de chrominance;
— L'inverseur électronique et les circuits de remise au pas;
— Les démodulateurs composés de :
  — Limiteurs,
  — Discriminateurs,
  — Cellules de désaccentuation;
— La matrice d'obtention de la chrominance verte;
— La ligne à retard de luminance et la trappe de sous-porteuse.

CUR. — Fichtre! Ignotus, vous en savez bientôt autant que moi.

IG. — Si c'était vrai! Et vous voulez me faire croire qu'il est possible de régler tout ça en cinq minutes.

CUR. — Il ne s'agit pas de régler : cela a été fait en usine. Mais, comme vous êtes un radioélectricien consciencieux, que vous avez un générateur de barres de couleurs ou un « servochrom », vous allez contrôler que tout fonctionne comme il faut. Tout d'abord, vous vérifierez que vos discriminateurs sont bien accordés.

IG. — Pourquoi donc? J'ai déjà vendu nombre de postes de radio à modulation de fréquence et jamais je n'ai contrôlé cet accord.

CUR. — Et vous avez bien fait. Mais les postes de télévision en couleurs passent, vous le savez, généralement la composante continue de la chrominance depuis les discriminateurs jusqu'au tube-image. Dès lors, si un discriminateur est désaccordé, c'est-à-dire s'il délivre une tension non nulle lorsqu'il est alimenté par la fréquence de repos de la sous-porteuse, vous aurez une dominante.

IG. — Mais alors ce n'est rien, je n'ai qu'à régler la teinte de fond dans ces conditions, et la dominante disparaît.

CUR. — Vous avez tort. Car savez-vous ce qui se passe lorsque vous recevez un programme monochrome?

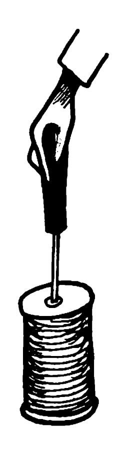
IG. — Bien sûr! L'absence de signaux d'identification bloque la partie « chrominance » du décodeur, et les trois canons du tube-image sont alimentés par le signal de luminance seul.

CUR. — Vous avez décidément bien appris votre leçon. Et comme vous avez déréglé votre teinte de fond, que se passe-t-il?

IG. — Eh bien, l'image monochrome aura une dominante complémentaire de celle qu'avait l'image en couleurs avant que fût déréglée la teinte de fond.

CUR. — Vous en déduirez donc très simplement la méthode de réglage de l'accord des discriminateurs. Si vous disposez d'un générateur de barres, vous pouvez supprimer la modulation de la sous-porteuse : vous avez alors une image monochrome sans que pour autant le

décodeur soit bloqué. Il faut que la teinte de fond soit la même avec sous-porteuse non modulée et sans sous-porteuse (ou sans lignes d'identification), autrement dit lorsque le décodeur est en service ou pas. Et pour ne pas tatonner, vous ajusterez, en tournant un noyau de bobinage du discriminateur (ne vous trompez pas de noyau : l'autre agit sur la linéarité!) séparément le rouge et le bleu, en coupant l'autre canon.



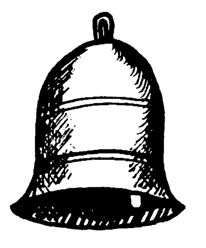
Ig. — Est-ce très pointu?

Cur. — C'est assez facile, car la tolérance est de ± 14 kHz, ce qui est large. Vous verrez d'ailleurs, lorsque je vous expliquerai tout à l'heure le fonctionnement du « servochrom », qu'un enfant pourrait le faire. Vous en profiterez pour contrôler que le système du blocage du décodeur, en l'absence de signaux d'identification, fonctionne bien, de même que la remise au pas de l'inverseur électronique. Si ce n'était pas le cas, vous regarderez si le flanc arrière de l'impulsion de retour trame est bien « positionné » dans le temps par rapport aux signaux d'identification; si ce circuit devait encore mal fonctionner, il faudrait agir sur le seuil de la bascule de Schmitt.

Les trois dernières minutes.

Ig. — Il me reste combien de temps?

Cur. — Trois minutes, plus qu'il n'en faut! Contrôlons cloche et désaccentuation. Il serait bien étonnant que ce soit déréglé, car, là aussi, les tolérances sont grandes (± 80 kHz pour la cloche). Quant aux cellules de désaccentuation, elles ne sont généralement pas réglables et ne risquent donc pas de se dérégler! Vous réduisez l'amplitude des barres à 30 % pour avoir des transitoires bien nets. En effet, au-delà d'un certain seuil, intervient, au codage, un écrêtage des pointes sur les signaux préaccentués.



Ig. — Je sais cela. C'est pour éviter une surmodulation du modulateur de fréquence.

Cur. — Exactement. Eh bien, il est évident qu'il y a alors une perte de définition chromatique. Vous examinerez donc des transitoires de faible amplitude, et le bon réglage de la cloche est celui qui conduit au temps de montée le plus faible sans suroscillation. Mais à l'oscilloscope, vous pouvez observer la sous-porteuse après la cloche. Son amplitude doit être constante. Mais il faudra prendre la précaution de couper sur votre mire le signal Y, car en sa présence et si le premier amplificateur du décodeur est affligé de gain différentiel, l'amplitude de la sous-porteuse apparaîtra modulée, même si la cloche est parfaitement accordée.

Ig. — Que reste-t-il à faire?

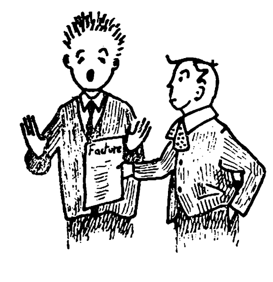
Cur. — Presque rien. Vous allez contrôler le bon fonctionnement de la matrice du vert et l'exactitude du rapport luminance-chrominance (c'est-à-dire de la saturation). Il vous suffit pour cela de regarder l'extrait vert de l'image de mire de barres. Vous savez que les quatre premières barres sont vertes avec la même amplitude.

Ig. — Et les quatre dernières noires.

Cur. — C'est cela. Qu'est-ce que cela veut dire si vous voyez quand même huit barres (au lieu de deux : une verte et une noire), une sur deux étant plus brillante?

Ig. — Il semblerait qu'une portion du signal Bleu soit passée dans le signal Vert. Car si l'on voyait quatre barres vertes alternées avec quatre barres noires, cela voudrait dire qu'il y a intervention entre le Vert et le Bleu...

Cur. — Et oui; il suffit alors de réduire la quantité de bleu intervenant dans la chrominance verte au niveau de la matrice. Et si la brillance de la plage verte décroît régulièrement de gauche à droite, cela



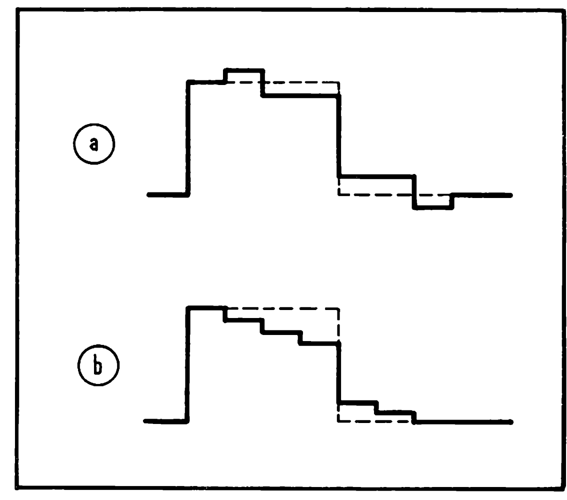


Fig. XIII-2. — Signal vert reproduit : a) avec matrice déséquilibrée (plus de rouge que de bleu) et b) avec saturation trop faible (signal Y trop important).

signifie qu'il y a trop de signal Y dans le vert. Vous rectifiez en diminuant le taux de limitation... et vous avez terminé. Vous pouvez présenter la facture au client.

Ig. — Mais... et les lignes à retard.

Cur. — Il n'y a rien à y faire, ce sont des composants passifs. Vous ne réglez pas les résistances...

Ig. — Eh bien vrai! Je m'attendais à plus compliqué.

Cur. — Ne vous trompez pas. Il vous faudra sans doute plus d'une heure pour régler votre premier télé; mais la pratique viendra très vite, surtout si vous avez un servochrom.

Un générateur vraiment universel.

Ig. — Cela fait plusieurs fois que vous prononcez ce nom barbare; et vous m'avez promis de m'expliquer le fonctionnement de cet appareil nouveau.

Cur. — Le servochrom est une mire qui délivre tous les signaux dont vous pouvez avoir besoin pour assurer le service (d'où *servo*) des récepteurs de télévision en couleurs (d'où *chrom*) sans autre appareil de mesure; c'est dire que les contrôles se font directement en observant l'écran du téléviseur. Il est donc très intéressant pour travailler chez le client, parce que entièrement indépendant. Il vous donne, d'une part, des signaux monochromes :

— Pour le réglage de la pureté : les impulsions de synchronisation;

— Pour celui de la convergence : la mire de carreaux;

— Pour la teinte de fond : une échelle de gris verticale en escalier. Et, d'autre part, il procure des signaux complexes pour le réglage de décodeur. Vous n'aurez alors qu'à observer deux plages sur votre écran et à vous assurer qu'elles sont identiques.

IG. — ???

CUR. — Prenez comme exemple le réglage de l'accord du discriminateur rouge. Vous avez mis hors service les canons Bleu et Vert. Le servochrom contient deux oscillateurs à quartz dont les fréquences sont égales aux fréquences de repos du rouge et du bleu. L'écran est rouge. Vous coupez les signaux « oscillateurs ». Que se passe-t-il?

IG. — L'écran devient noir.

CUR. — Ignotus, je n'ai pas perdu ma journée : voilà la première ânerie que vous proférez aujourd'hui.

IG. — Mais puisqu'il n'y a plus de signal...

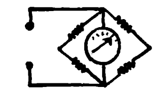
CUR. — Réfléchissons. Lorsqu'on alimente un discriminateur par une onde sinusoïdale calée sur sa fréquence d'accord, que délivre-t-il?

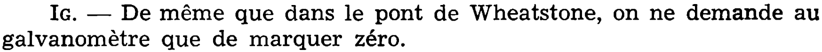
IG. — Rien.

CUR. — Bon. Et si on ne l'alimente pas du tout?

IG. — Rien non plus...

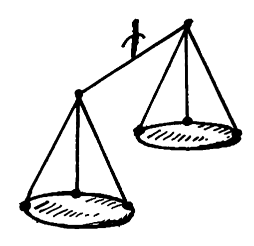
CUR. — Vous voyez! Donc, lorsque je coupe le signal « oscillateur », le signal de sortie ne doit pas changer, et l'écran doit présenter toujours la même luminance. C'est ce qu'on appelle en physique une *méthode de zéro*. On l'applique en particulier avec la balance ou le pont de Wheatstone. C'est la méthode la plus précise. Et pourtant l'instrument de mesure (ici, l'œil) peut être faux : on ne lui demande que d'être sensible, puisqu'il n'a qu'à reconnaître qu'il n'y a pas de différence de luminance entre deux plages qui se succèdent rapidement dans le temps.





IG. — De même que dans le pont de Wheatstone, on ne demande au galvanomètre que de marquer zéro.

CUR. — De même que quand on fait une double pesée, on ne demande à l'aiguille que de reprendre la même position.



IG. — Eh bien, le servochrom me semble très ingénieux. Et les autres réglages?

CUR. — Sont fondés sur le même principe.

IG. — Décidément, j'ai l'impression que la télévision en couleurs ... c'est vraiment presque simple.

CUR. — Ignotus, mon ami, il est courant de vous entendre dire : « C'est bougrement compliqué. » Mais sachez que, depuis des années, des techniciens se sont acharnés à vous simplifier le travail.

IG. — Et je les remercie, ainsi que vous, mon ami, dont la patience n'a d'égale que la science.

CUR. — Vous rimez, vous voilà devenu poète?

IG. — Mais certainement. D'ailleurs, l'introduction de la couleur à la télévision n'est-elle pas en quelque sorte le triomphe de la poésie dans notre profession?...



CHAPITRE XIV

Les réglages du tube-image décrits dans le chapitre XII étant effectués, il convient de procéder à la mise au point des circuits appartenant plus spécialement aux téléviseurs PAL. Aussi examine-t-on ici...

... Mire de barres. — Arc-en-Ciel. — Matrice du vert. — Saturation. — Est-ce presque simple?...

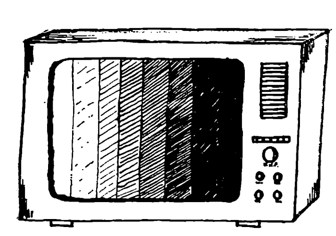
RÉGLAGE D'UN TÉLÉVISEUR PAL

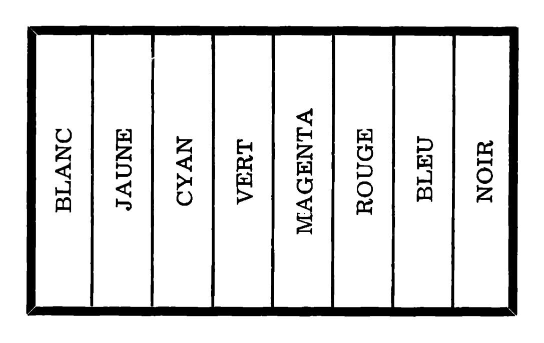
Du côté du codeur :

Curiosus. — Vous pouvez effectuer les réglages du tube-image en recevant la mire émise par le Centre National de Télédiffusion. Mais, comme vous le verrez par la suite, votre travail sera simplifié si vous faites l'emplette d'un générateur de service ou d'une mire de barres de couleur comme celle qui est émise par le C.N.T.

Ignotus. — En quoi consiste cette mire?

Cur. — En huit barres verticales qui sont de gauche à droite :

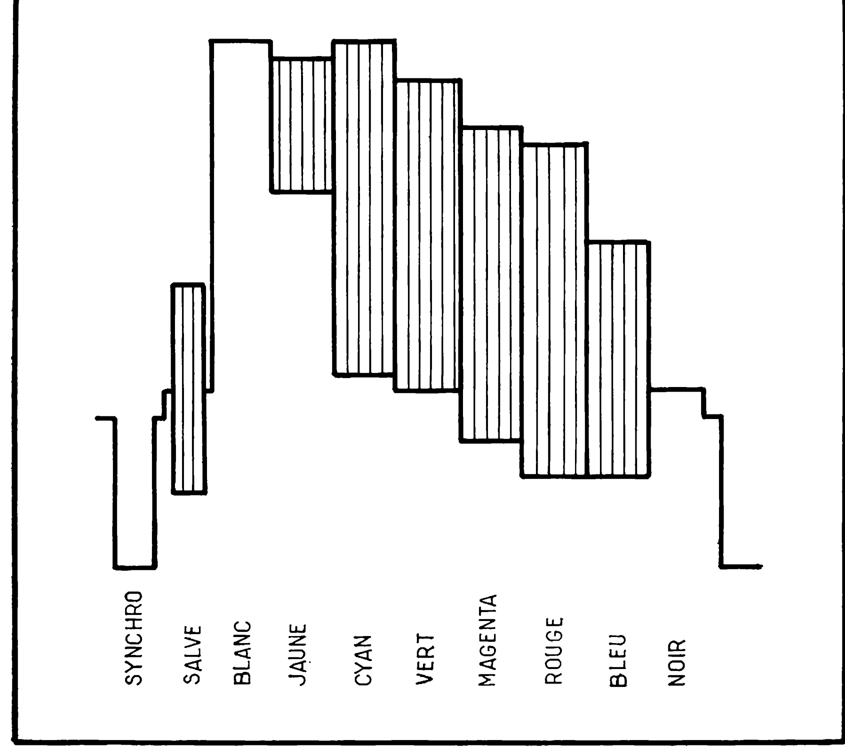




Vous remarquerez que les couleurs sont classées par ordre de luminance décroissante. Elles sont toutes saturées à 100 % (sauf le blanc et le noir, bien entendu), et on les obtient à partir de signaux vidéo simples pour les primaires. L'amplitude de ces primaires peut être de 75 % ou 30 % du niveau nominal (c'est-à-dire que le blanc est en

0,75 V
VERT
0,75 V
ROUGE
0,75 V
BLEU
BLANC JAUNE CYAN VERT MAGENTA ROUGE BLEU NOIR

Fig. XIV-1. — Forme des signaux primaires à 75 %. L'addition de ces signaux permet de former les barres de couleur...

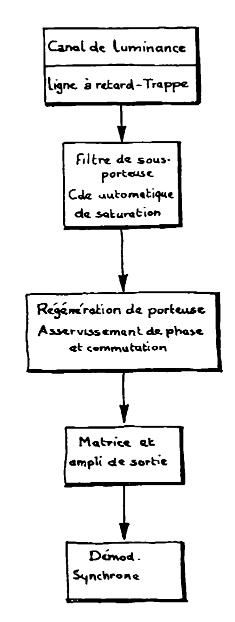


... Signal composite réel à 75 % d'amplitude, relevé à l'oscilloscope.

fait un gris à 75 % ou à 30 %, quoique quelquefois le blanc soit calé à 100 % et que l'amplitude des sept autres barres seulement soit réglée à 75 % ou à 30 %).

IG. — Et en quoi ces barres sont-elles utiles?

CUR. — Maintenant qu'en un quart d'heure vous avez réglé le tube-image, il vous reste cinq minutes pour contrôler le bon fonctionnement du décodeur.



IG. — Alors dépêchons-nous!

CUR. — Ce ne sera pas nécessaire. Vous rappelez-vous les éléments essentiels du décodeur?

IG. — Je vais essayer de ne pas en oublier. D'amont en aval nous avons :

— le canal de luminance avec sa ligne à retard et sa trappe de sous-porteuse;

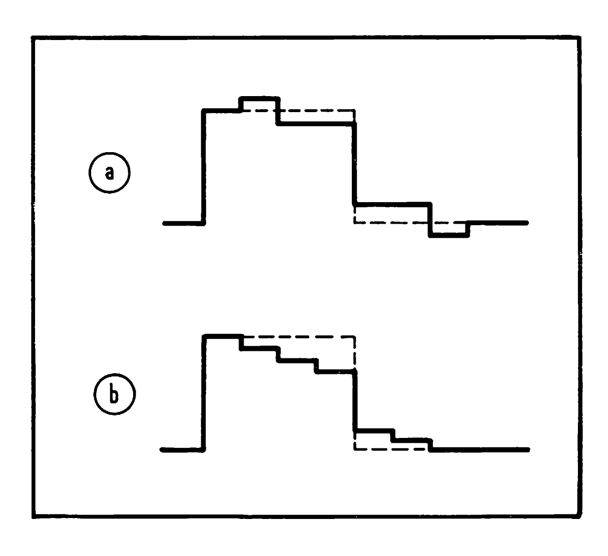


Fig. XIV-2. — Signal vert reproduit : a) avec matrice déséquilibrée (plus de rouge que de bleu) et b) avec saturation trop faible (signal Y trop important).

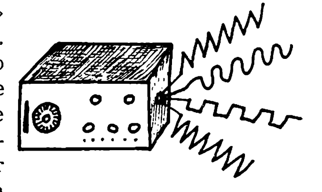
— le filtre de sous-porteuse avec la commande automatique de saturation;
— le système de séparation des informations de chrominance avec ligne à retard;
— la régénération de porteuse avec l'asservissement de phase et la commutation;
— les démodulations synchrones;
— les matrices et les amplificateurs de sortie.

CUR. — Fichtre! Ignotus, vous en savez bientôt autant que moi.

IG. — Si c'était vrai! Et vous voulez me faire croire qu'il est possible de régler tout ça en cinq minutes.

CUR. — Il ne s'agit pas de régler : cela a été fait en usine. Mais, comme vous êtes un radioélectricien consciencieux, que vous avez un générateur de barres de couleurs ou un « Arc-en-Ciel », vous allez contrôler que tout fonctionne comme il faut.

IG. — Est-ce une insulte d'un nouveau genre que de dire d'un « radioélectricien consciencieux » qu'il a un arc-en-ciel?



Cur. — Mais, comme vous prenez la mouche! L' « Arc-en-Ciel » est le nom d'un générateur de service qui délivre toutes les couleurs. Voilà tout! Il vous faudra, bien sûr, un oscilloscope cathodique vidéo de bonne qualité. Vous contrôlerez donc que la trappe est bien placée et que le fait de supprimer la sous-porteuse déconnecte cette trappe automatiquement. Mais le réglage le plus important est celui de l'égalisation des phases et des amplitudes des signaux directs et retardés pour la séparation correcte des informations de chrominance. Notons que l'on peut simuler l'effet PAL sur un oscilloscope en réglant la base de temps de façon qu'il y ait un nombre impair de lignes sur l'oscillogramme. On fera se superposer alors des lignes de type NTSC (avec R — Y positif) avec des lignes de type PAL (avec R — Y négatif). Le contrôle du bon calage de la phase se fera alors en court-circuitant la sortie de la ligne à retard et en observant l'entrée selon ce type de balayage avec la loupe électronique.

Les trois dernières minutes.

Ig. — Il me reste combien de temps?

Cur. — Trois minutes, plus qu'il n'en faut!

Ig. — Et que faut-il faire?

Cur. — Presque rien. Vous allez contrôler le bon fonctionnement de la matrice du vert et l'exactitude du rapport luminance-chrominance (c'est-à-dire de la saturation). Il vous suffit pour cela de regarder l'extrait vert de l'image de mire de barres. Vous savez que les quatre premières barres sont vertes avec la même amplitude.

Ig. — Et les quatre dernières noires.

Cur. — C'est cela. Qu'est-ce que cela veut dire si vous voyez quand même huit barres (au lieu de deux : une verte et une noire), une sur deux étant plus brillante?

Ig. — Il semblerait qu'une portion du signal Bleu soit passée dans le signal Vert. Car si l'on voyait quatre barres vertes alternées avec quatre barres noires, cela voudrait dire qu'il y a intervention entre le Vert et le Bleu...



Cur. — Et oui; il suffit alors de réduire la quantité de bleu intervenant dans la chrominance verte au niveau de la matrice. Et si la brillance de la plage verte décroît régulièrement de gauche à droite, cela signifie qu'il y a trop de signal Y dans le vert. Vous rectifiez en ajustant la saturation... et vous avez terminé. Vous pouvez présenter la facture au client.

Ig. — Mais... et les lignes à retard.

Cur. — Il n'y a rien à y faire, ce sont des composants passifs. Vous ne réglez pas les résistances...

Ig. — Eh bien vrai! Je m'attendais à plus compliqué.

Cur. — Ne vous trompez pas. Il vous faudra sans doute plus d'une heure pour régler votre premier télé; mais la pratique viendra très vite, surtout si vous avez une mire de service pour la couleur comme l'Arc-en-Ciel.

Ig. — Décidément, j'ai l'impression que la télévision en couleurs... c'est vraiment presque simple.

Cur. — Ignotus, mon ami, il est courant de vous entendre dire : « C'est bougrement compliqué. » Mais sachez que, depuis des années, des techniciens se sont acharnés à vous simplifier le travail.

Ig. — Et je les remercie, ainsi que vous, mon ami, dont la patience n'a d'égale que la science.

Cur. — Vous rimez, vous voilà devenu poète?

Ig. — Mais certainement. D'ailleurs, l'introduction de la couleur à la télévision n'est-elle pas en quelque sorte le triomphe de la poésie dans notre profession?...



En guise de conclusion

LE MIRACLE DE LA TÉLÉVISION EN COULEURS

Que des images en couleurs puissent être transmises sur les ailes des ondes hertziennes, cela confine au miracle. Telle est la conclusion qui s'impose au lecteur ayant, avec diligence, assimilé le contenu des pages qui précèdent.

Au même titre que le cinéma, la télévision met à profit un des défauts de notre sens de la vision : son pouvoir insuffisant de *résolution temporelle;* autrement dit, la persistance des sensations visuelles qui fait que nous percevons la totalité d'une image alors que, à tout instant donné, seule une de ses surfaces élémentaires apparaît sur l'écran du tube-image.

C'est le manque de pouvoir de *résolution spatiale* qui permet de transmettre des images en couleurs sans élargir tant soit peu la bande des fréquences de modulation : l'œil ne distinguant pas de faibles détails de surfaces en couleurs, celles-ci n'occupent dans le signal qu'une bande étroite de fréquences porteuse d'une quantité réduite d'informations.

***

L'avènement de la télévision en couleurs a été grandement facilité par la prodigieuse somme d'expérience acquise dans le domaine de la télévision monochrome. Tant du côté émission que du côté réception, l'appareillage conçu pour le « noir et blanc » sert, pour une bonne partie, dans la transmission de la couleur. Les différences interviennent principalement dans

la composition du signal vidéo (soit dans les circuits de codage et de décodage) et — avant tout — dans les procédés et appareils de traduction lumière-courant (caméras de prise de vues) et de traduction inverse courant-lumière (tube-images).

Rien, de nos jours, ne résiste à l'électronique. Quelle que soit la complexité d'un problème, on lui trouve une solution... quand ce n'est pas plusieurs, comme c'est (hélas!) le cas de la télévision en couleurs. Mais à côté de très ingénieuses conceptions de circuits, il restait encore à trouver le moyen de restituer les images en couleurs sur l'écran d'un tube.

Lorsqu'il fut présenté, le projet du tube à masque d'ombre paraissait une irréalisable utopie, car il supposait une incroyable précision dans la géométrie de tous ses éléments : canons, masque, écran trichrome. Or, — et ceci tient du miracle, — le tube fut réalisé; et il fonctionne parfaitement!

⁂

Loin de constituer le but ultime des recherches effectuées dans ce domaine, le tube « shadow mask » n'est qu'une étape sur la voie du développement de la télévision en couleurs. D'autres modèles, plus perfectionnés, l'ont plus ou moins supplanté.

L'évolution tend à améliorer le rendement énergétique des tubes (en procurant une meilleure brillance avec une moindre puissance mise en jeu), à rendre les écrans plats et rectangulaires et à réduire la profondeur des ampoules. Tôt ou tard, cela doit aboutir à un dispositif qui ne méritera plus le nom de « tube », puisqu'il sera tout entier constitué par un écran plat, accroché au mur comme un tableau. Mais nous n'en sommes pas encore là...

⁂

N'empêche que, de nos jours, le rêve est devenu réalité : à des centaines de kilomètres à la ronde des images pleines de vie sont transmises avec leurs couleurs et leurs sons. L'espace et le temps sont vaincus. Les ondes enferment le monde dans leur joyeuse ronde.

Puisse ce miracle inspirer aux humains le sens de leur unité planétaire!

TABLE DES MATIÈRES



I.S.B.N. 2 7091 0589 0

Simple ?... Non, on ne saurait qualifier ainsi la technique de la télévision en couleurs.

On peut néanmoins la rendre aisément accessible à ceux qui ont assimilé les notions fondamentales de la télévision en " noir et blanc ". Tel est le but du présent ouvrage.

Pour l'atteindre, les auteurs examinent tout d'abord la couleur en tant que phénomène physique et en tant que sensation psycho-physiologique. Puis, ils exposent les éléments de la colorimétrie et la structure de divers types de tube-image pour la couleur.

Après l'examen de systèmes « sequentiels » naguère expérimentés, mais qui ne satisfont pas le principe de la double compatibilité, l'ouvrage présente les trois principaux systèmes actuels : NTSC, PAL et SECAM. Le schéma d'un récepteur type SECAM est analysé en détails ; et le processus de la mise au point d'un tel appareil est exposé dans le chapitre final.

Abondamment illustré, non dépourvu d'humour, le livre sera lu avec plaisir et profit.

3e édition